



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书

主 编 杨国桢 副主编 程福臻

光 学



(第二版)

崔宏滨 李永平 康学亮 编著



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书

主 编 杨国桢 副主编 程福臻

光 学

(第二版)

崔宏滨 李永平 康学亮 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书讲授大学物理课程中的光学部分,内容包括波动光学、几何光学以及光的量子性导论。全书以光学实验为基础,从光的物理模型出发,对光线的传播、光学成像、光的干涉、光的衍射、光的偏振与双折射、光与物质的相互作用、光的量子性等问题进行了较全面和深入的阐释,并介绍了光学的发展及其在各个领域中的应用。对于光学中基本的实验现象,说明详细;对于光学中基本的物理概念,阐述准确;对于光学的理论体系,推导严谨。附有较多的例题和练习题,有利于读者掌握处理光学问题的方法和加深对光学概念的理解,便于读者自学。

本书可作为理工科以及师范院校物理类专业的本科生教材,也可供理工科非物理类有关专业的学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

光学/崔宏滨,李永平,康学亮编著. —2版. —北京:科学出版社,2015.7
(中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书/杨国桢主编)
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978-7-03-045012-8

I. ①光… II. ①崔…②李…③康… III. ①光学-高等学校-教材
IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 130818 号

责任编辑:窦京涛 王 刚 / 责任校对:彭 涛
责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 7 月第 二 版 印张:26 1/4

2015 年 7 月第八次印刷 字数:529 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版丛书序

2008年这套丛书正式出版,至今使用已五年,回想当初编书动机,有一点值得一提.我初到中国科学技术大学理学院担任院长,一次拜访吴杭生先生,向他问起科大的特点在哪里,他回答在于它的本科教学,数理基础课教得认真,学生学得努力,特别体现在十年CUSPEA考试(中美联合招收赴美攻读物理博士生考试)中,科大学生表现突出.接着谈起一所大学对社会最重要的贡献是什么,他认为是培养出优秀的学生,当前特别是培养出优秀的本科生.这次交谈给了我深刻的印象和启示.后来一些参加过CUSPEA教学的老教师向我提出,编一套科大物理类本科生物理教材,我便欣然同意,并且在大家一致的请求下担任了主编.我的期望是,通过编写这套丛书将CUSPEA教学的一些成果能保留下来,进而发扬光大.

应该说这套书是在十年CUSPEA班的教学内容与经验基础上发展出来的,它所涵盖的内容有相当的深度与广度,系统性与科学的严谨性突出;另外,注重了普通物理与理论物理的关联与融合、各本书物理内容的相互呼应.但是,使用了五年后,经过教师的教学实践、与学生的互动,发现了一些不尽如人意的地方和错误,这次能纳入“‘十二五’普通高等教育本科国家级规划教材”是个很好的修改机会,同时大家也同意出版配套的习题解答,也许更便于校内外的教师选用.为大学本科生教学做一点贡献是我们的责任,也是我们的荣幸.盼望更多的使用本套书的老师和同学提出宝贵建议.



2013年10月于合肥

第一版丛书序

2008 年是中国科学技术大学建校五十周年. 值此筹备校庆之际, 由几位长年从事基础物理教学的老师建议, 编著一套理科基础物理教程, 向校庆五十周年献礼. 这一建议在理学院很快达成了共识, 并受到学校的高度重视和大力支持. 随后, 理学院立即组织了在理科基础物理教学方面有丰富教学经验的老师, 组成了老、中、青相结合的班子, 着手编著这套丛书, 并以此进一步推动理科基础物理的教学改革与创新.

中国科学技术大学在老一辈物理学家、教育家吴有训先生、严济慈先生、钱临照先生、赵忠尧先生、施汝为先生的亲自带领和指导下, 一贯重视基础物理教学, 历经五十年如一日的坚持, 现已形成良好的教学传统. 特别是严济慈和钱临照两位先生在世时身体力行, 多年讲授本科生的力学、理论力学、电磁学、电动力学等基础课. 他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德, 带领出一批又一批杰出的年轻教员, 培养了一届又一届优秀学生. 这套丛书的作者, 应该说都直接或间接受到过两位先生的教诲. 出版这套丛书也是表达作者对先生的深深感激和最好纪念.

这套丛书共九本:《力学与理论力学(上、下)》、《电磁学与电动力学(上、下)》、《光学》、《原子物理与量子力学(上、下)》、《热学 热力学与统计物理(上、下)》. 每本约 40 万字, 主要是为物理学相关专业本科生编写的, 也可供工科专业物理教师参考. 每本书的教学学时约为 72 学时. 可以认为, 这套丛书系列不仅是普通物理与理论物理横向关联、纵向自洽的基础物理教程, 同时更加适合我校理科人才培养的教学安排, 并充分考虑了与数学教学的相互配合. 因此, 在教材的设置上,《力学与理论力学(上、下)》、《电磁学与电动力学(上、下)》中, 上册部分分别是普通物理内容, 而下册部分为理论物理内容. 还要指出的是, 在《原子物理与量子力学(上、下)》、《热学 热力学与统计物理(上、下)》中, 考虑到普通物理与理论物理内容的界限已不再那样泾渭分明, 而比较直接地用现代的、实用的概念、物理图像和理论来阐述, 这确实不失为一种有意义的尝试.

这套丛书在编著过程中, 不仅广泛吸取了校内老师的经验, 采纳了学生的意见, 而且还征求了中国科学院许多相关专家的意见和建议, 体现了“所系结合”的特点. 同时, 还聘请了兄弟院校及校内有丰富教学经验的教授进行双重审稿, 期望将其错误概率降至最低.

历经几年,在科学出版社大力支持下,这套丛书终于面世,愿她能在理科教学改革与创新中起到一点作用,成为引玉之砖,共同来促进物理学教学水平的提高及其优秀人才的培养,并望广大师生及有关专家们继续提出宝贵意见和建议,以便改进.最后,对方方面面为这套丛书编著与出版的完成所付出艰辛努力及其给予关心、帮助的同志表示深切感谢!

中国科学技术大学理学院院长

杨国桢 院士

2007年10月

第二版前言

本书第一版自 2008 年发行以来,被国内多所大学选为教材.此次再版,根据教学实践和读者的建议,编著者对本书的结构和内容进行了以下修订:

(1) 调整了全书的结构.第一版全书共 11 章,第二版调整为 9 章.

(2) 调整、合并了部分章节.第一版中“第 10 章几何光学的近轴理论”,调整为“第 2 章光线与几何光学”;第一版中“第 2 章光的叠加原理”与“第 4 章光的相干叠加”合并为“第 3 章光的相干叠加与非相干叠加”;第一版中“第 3 章光的偏振”与“第 8 章光在晶体中的双折射”合并为“第 7 章光的偏振及双折射”.

(3) 增删了部分内容.主要是增加了部分例题,删除了类型重复的习题.

(4) 更正了第一版中的错误.

作为一本物理学教材,一方面要能够体现物理学理论体系的严谨和完整;另一方面要便于在课堂教学中使用和读者自学.有时这两方面是相互矛盾的,所以要权衡利弊,并有所取舍.从另一个角度看这个问题,很容易得出这样的结论:任何一本物理教材都做不到完美.既然如此,编著者在修订的过程中,力求使本书更有特色,更能体现光学的特点.

教材的作用是将已有的科研成果和科学体系介绍给读者,使其能够在最短的时间内对这一学科的理论体系有最清晰的认识,对研究成果有最深刻的理解,对研究方法有最正确的掌握.相对于科学研究,编写教材不是原创性的工作,而是对前人工作和已有知识的总结和介绍.但是这样的总结和介绍,是基于编著者对已有成果的掌握和对知识体系的理解,所以物理教材的特色就是编著者对物理定律、物理概念、物理方法掌握和理解程度的体现.

在几何光学的理论体系中,最重要的概念就是光线.所谓“三大实验定律”就是关于光线的传播、反射和折射的规律,而光学成像也是基于“物点发出光线束”、“光学元件对光线束进行变换”和“光线束会聚成像点”这样的物理思想.实验定律是对实际光线(实光线)的方向的描述,成像过程中实物点发出实光线,实光线会聚成实像点.从逻辑上看,可以引入“虚光线”,这是一条与实光线共线但实际上并不存在的光线.引入虚光线的概念后,成像过程中“虚物”、“虚像”就显得非常自然,而费马原理的适用范围就能扩展到虚物成像和成虚像的情形.这样做就使得几何光学的逻辑体系更加完整.

波动光学涉及光的干涉、衍射与偏振问题,这些问题都采用波的叠加原理进行处理,有些是相干叠加,有些是非相干叠加.光的相干性是波动光学的核心概念.编

著者的观点是,与其泛泛讨论光的相干性,不如弄明白获得相干光的具体方法.这就要先搞清楚光波与机械波、无线电波的区别.通过对杨氏干涉的深入探究,能够揭示获得相干光的方法,并准确地理解光的相干性.掌握了这些基本的概念,则很容易将波动光学的各部分内容用叠加原理这条主线贯串起来,读者就能很容易理解波动光学的理论体系.

虽然新版进行了较大的调整,但本书的特色依然保持,相信新版本更便于读者阅读.

全书由崔宏滨执笔,中国科学技术大学吴强教授、北京大学王若鹏教授和清华大学蒋硕副教授审阅了此书稿,作者在此表示衷心的感谢.

崔宏滨 李永平 康学亮

2014年11月18日

第一版前言

本书由编者在中国科学技术大学理学院的光学讲稿修改补充而成。

根据编者多年教学工作的经历,光学是大学物理系列中一门较有特色的课程。一方面,对于已经稔熟力学、热学和电磁学等经典物理的读者,光学显得不那么“经典”,因为无论是几何光学还是波动光学,都要用到不少近似的处理方法,通过列方程而得到严格解的情况在光学领域倒是不多。另一方面,光学中的主要概念“光线”“光波”“光子”看起来互不相关,各有各的处理方法,但是内容又相互渗透,例如,几何光学中涉及光在介质中的色散时,就需要借用波长的概念,而波长只有在波动光学中才能定义,等等。

正是基于光学的特点,编者在本书中对光学中常用的傍轴条件、远场条件以及这些近似条件的具体应用进行了比较详细的说明,同时又强调和突出了“光线”、“光波”、“光子”这些光的物理模型,并通过具体的实例说明这些模型的内在联系。

第1章~第9章是波动光学部分,介绍光的波动模型、光的叠加原理、光的偏振、光的相干叠加、光的干涉衍射、傅里叶变换光学与全息照相、在晶体中的双折射以及光与物质的相互作用。第10章为几何光学,重点讨论光的成像理论。第11章为光的量子性导论,从实验事实出发,探讨光的波粒二象性。

关于成像的几何光学是光学中最早发展起来的分支,这是一套唯象的理论体系,较少涉及光的本质,所以并没有受到惠更斯和牛顿波粒之争的影响,因而很多光学教材都以几何光学部分作为开篇。本书将几何光学置于波动光学之后,并强调几何光学是波动光学(衍射)的零级近似,这样做的目的方面要指出衍射是无处不在的,另一方面也是使读者不至于将几何光学看成一个孤立的分支。在最后一章探讨光的量子学说建立的过程中,对黑体辐射的实验规律和理论研究进行了较详细的介绍,黑体辐射长波部分的规律可以用波动理论说明,而短波部分只能用量子理论才能解释,之所以这样做,就是试图使读者体会到波长越短,量子性越显著,而且从物理特征上,光波到光子是一种自然的过渡,从整个物理学的体系上,光学也是经典物理学向量子物理学发展和过渡的桥梁和纽带。

大学阶段的光学课程中,波动光学是整个光学的核心内容。而贯穿整个波动光学的主线则是光波的叠加原理。传统的方法是将光的干涉、衍射、偏振分别讲述,这样做自有好处,无论教还是学都很方便,但是,缺点在于往往容易使初学者混淆干涉、衍射的区别和联系,也不容易区分相干叠加与非相干叠加。其实干涉、衍射都是光的相干叠加,在处理方法上,前者可以直接应用光波的叠加原理将几列波的振动

或复振幅直接相加,而后者则需要通过求解菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式;在实验装置上,干涉是将光分束,而衍射则无需如此.在分析光的偏振特性时,往往是将正交的光矢量进行叠加,这是一种非相干叠加.因而本书在章节次序上,先介绍了用非相干叠加方法处理光的偏振,接着将杨氏干涉和菲涅耳、夫琅禾费衍射在同一章中讲授.在读者了解了干涉、衍射、偏振的原理之后,分别对具体的干涉装置、衍射光栅和光在晶体中的双折射进行了介绍.

本书强调物理概念的清晰和准确,因而对诸如偏振态的分析、干涉的物理过程、衍射积分的运算、双折射导致偏振态的改变等问题进行了尽可能详细的讨论.书中的例题大多具有一定的难度,目的是引导读者掌握处理光学问题的正确方法.

光学世界绚丽多彩,形象生动,授课过程中要用到大量的图片,为此,编者特意制作了一套多媒体课件,其中包括光学系统的图解、演示实验等,便于课堂教学和读者自行浏览,许多受到篇幅限制而难以在书中展示的内容,也与上述课件一并收录在随书的光盘中.

北京大学钟锡华教授和中国科学技术大学吴强教授所著的光学教材长期被本书编者用作讲课的范本,本书编者之一更是不止一次面聆两位教授的指导.这次幸得两位专家评审本书,发现并纠正了书稿中的许多讹误和纰漏.中国科学院物理研究所傅盘铭研究员也为本书写出了详细中肯的评阅意见,使编者大受裨益.这套丛书的主编杨国桢院士和副主编程福臻教授多次听取本书编者汇报,为本书确定了编写的基本原则.对于他们付出的心血,编者在此表示由衷的感谢.

编者诚恳希望读者指出书中的不足之处,以便我们有机会改正.

崔宏滨 李永平 段开敏

2008年4月21日

目 录

第二版丛书序

第一版丛书序

第二版前言

第一版前言

第 1 章 光的波动模型	1
1.1 光波	1
1.1.1 可见光	1
1.1.2 光波产生的物理机制	2
1.1.3 产生光波的偶极振子模型	4
1.1.4 光波的周期性	5
1.1.5 简谐光波	8
1.1.6 光矢量	10
1.1.7 光强	11
1.1.8 光的传播	13
1.1.9 光程差与相位差	14
1.2 简谐光波的数学表示	16
1.2.1 矢量表示与标量表示	16
1.2.2 简谐光波的描述	17
1.2.3 简谐光波按波面分类	17
1.2.4 光波的复振幅表示	22
1.2.5 有关光波的几个概念	22
1.3 傍轴条件与远场条件	24
1.3.1 轴上物点的傍轴条件和远场条件	24
1.3.2 轴外物点的傍轴条件和远场条件	26
第 2 章 光线与几何光学	28
2.1 几何光学的物理基础	28
2.1.1 光线模型	28
2.1.2 光线的实验定律	28
2.2 几何光学的基本原理	32

2.2.1	光传播的可逆性原理	32
2.2.2	费马原理	33
2.3	棱镜与光纤	34
2.3.1	棱镜对光的折射	34
2.3.2	色散棱镜	36
2.3.3	全反射棱镜	38
2.3.4	光纤	39
2.4	单球面成像	40
2.4.1	折射面、反射面对光线的变换	40
2.4.2	物与像的虚实性	41
2.4.3	傍轴光在单球面上的折射成像	45
2.4.4	高斯光学中的符号约定	54
2.4.5	傍轴光在单球面上的反射成像	56
2.5	薄透镜成像	61
2.5.1	逐次成像法	61
2.5.2	薄透镜的物像公式	62
2.5.3	光具组成像	66
2.5.4	薄透镜成像的作图法	69
2.6	理想共轴光具组成像的高斯定理	71
2.6.1	理想光具组	71
2.6.2	共轴球面系统的基点和基面	73
2.6.3	共轴球面系统的物像关系	77
2.6.4	基点和基平面的确定	79
2.7	非傍轴光线的阿贝正弦条件与齐明点	83
2.7.1	透镜组的阿贝正弦条件	83
2.7.2	齐明透镜与齐明点	84
2.7.3	齐明透镜组	85
2.8	几何光学仪器	86
2.8.1	眼睛	86
2.8.2	目镜	89
2.8.3	物镜	92
2.8.4	显微镜	95
2.8.5	望远镜	97
2.8.6	照相机	99

第3章 光的相干叠加与非相干叠加	102
3.1 光波的叠加原理	102
3.1.1 光波的独立传播定律	102
3.1.2 光波的叠加原理	102
3.2 同频率、同振动方向光波叠加的方法	103
3.2.1 代数法	103
3.2.2 复数法	104
3.2.3 振幅矢量法	105
3.3 光波叠加的强度	106
3.3.1 光波叠加的特点	106
3.3.2 光波叠加强度的计算方法	107
3.3.3 光波的相干叠加与非相干叠加	107
3.3.4 光波的相干条件	110
3.4 波包与群速度	114
3.5 杨氏干涉与相干光的获得	118
3.5.1 干涉装置	118
3.5.2 杨氏干涉的物理过程	119
3.5.3 相干光的获得	121
3.6 干涉图样与干涉强度	121
3.6.1 杨氏双孔干涉	121
3.6.2 杨氏双缝干涉	124
3.6.3 干涉条纹的可见度	125
3.6.4 两列平面光波的干涉	125
3.7 惠更斯-菲涅耳原理	127
3.7.1 次波模型	127
3.7.2 次波的线性叠加:惠更斯-菲涅耳原理	130
3.8 菲涅耳衍射	133
3.8.1 衍射装置与现象	133
3.8.2 用半波带法分析菲涅耳圆孔衍射	134
3.8.3 半波带方程	141
3.8.4 一般情形下的波带	142
3.8.5 菲涅耳半波带的应用——波带片	144
3.9 夫琅禾费单缝和矩孔衍射	146
3.9.1 夫琅禾费单缝衍射装置	146

3.9.2	单缝衍射强度分布	147
3.9.3	单缝衍射图样的特点	152
3.9.4	单缝衍射的应用	155
3.9.5	夫琅禾费矩孔衍射	156
3.10	夫琅禾费圆孔衍射	158
3.10.1	圆孔衍射强度	158
3.10.2	衍射图样的特点	160
3.11	衍射的 0 级近似与几何光学	164
3.11.1	衍射中央主极大的特殊性	164
3.11.2	衍射与孔径的关系	165
3.11.3	几何光学是衍射的 0 级近似	166
3.11.4	望远镜的分辨本领与衍射极限	166
第 4 章	干涉仪与光的时空相干性	170
4.1	分波前的干涉装置	170
4.1.1	菲涅耳双面镜	171
4.1.2	劳埃德镜	174
4.1.3	菲涅耳双棱镜	175
4.1.4	对切透镜	176
4.2	光的空间相干性	179
4.2.1	光源的非相干性	179
4.2.2	扩展光源对相干性的影响	182
4.3	光的时间相干性	185
4.3.1	非单色光的干涉	185
4.3.2	相干时间	187
4.4	光波在界面处的复振幅	188
4.4.1	菲涅耳公式	188
4.4.2	出现半波损失的特例	192
4.4.3	斯托克斯倒逆关系	195
4.5	薄膜干涉	196
4.5.1	等倾干涉	196
4.5.2	等厚干涉	202
4.6	分振幅的干涉装置	204
4.6.1	迈克耳孙干涉仪	204
4.6.2	马赫-曾德尔干涉仪	209

4.6.3 干涉滤波片	210
4.6.4 牛顿环(圈)	212
4.7 法布里-珀罗干涉仪	214
4.7.1 多光束干涉	214
4.7.2 多光束干涉的光强	214
4.7.3 干涉场的特性	218
第5章 衍射光栅与光谱仪	223
5.1 多缝夫琅禾费衍射	223
5.1.1 衍射强度	224
5.1.2 双缝衍射	234
5.1.3 光栅衍射的特点	235
5.1.4 干涉与衍射的区别和联系	237
5.2 光栅光谱	237
5.2.1 谱线的角宽度和光栅的色分辨本领	238
5.2.2 光栅的色散与自由光谱范围	239
5.3 闪耀光栅	241
5.3.1 问题的提出与解决方案	241
5.3.2 闪耀光栅的结构	242
5.3.3 闪耀光栅衍射的一般性分析	243
5.3.4 两种常用的照明方式	245
5.4 单色仪与光谱仪	245
5.5 正弦光栅	247
5.6 X射线在晶体中的衍射	249
5.6.1 晶格点阵	249
5.6.2 X射线在晶体中的衍射	250
5.6.3 晶体X射线衍射的实验方法	252
第6章 傅里叶变换光学	255
6.1 衍射屏对波前的变换	255
6.1.1 衍射系统的屏函数	255
6.1.2 简单光波场的波前光场	256
6.1.3 透镜的相位变换函数	257
6.1.4 光楔的相位变换函数	260
6.2 接收场的傅里叶变换	261
6.2.1 衍射积分的近似	261

6.2.2 衍射系统的傅里叶变换	263
6.3 夫琅禾费光栅衍射的傅里叶频谱分析	263
6.3.1 屏函数的傅里叶变换	263
6.3.2 周期性屏函数的傅里叶变换	265
6.3.3 非周期性的屏函数的傅里叶变换	267
6.4 阿贝成像原理	269
6.4.1 阿贝成像原理的数学验证	269
6.4.2 阿贝成像原理的实验验证	271
6.4.3 图像处理	273
6.4.4 θ 调制	275
6.5 相衬显微镜	276
6.6 全息照相	277
6.6.1 全息照相的基本原理	277
6.6.2 全息照相的装置	280
第7章 光的偏振与双折射	281
7.1 光的偏振特性	281
7.1.1 横波的偏振性	281
7.1.2 起偏与检偏	283
7.2 光的偏振态	284
7.2.1 自然光	284
7.2.2 部分偏振光	284
7.2.3 平面偏振光	285
7.2.4 圆偏振光	286
7.2.5 椭圆偏振光	288
7.3 反射、折射所引起的偏振态的改变	293
7.3.1 偏振态的改变	293
7.3.2 垂直入射的情形	293
7.3.3 布儒斯特定律	294
7.3.4 玻璃片堆和布儒斯特窗	294
7.4 光在晶体中的双折射	296
7.5 单轴晶体中光的波面	300
7.5.1 晶体中 o 光和 e 光的波面	300
7.5.2 单轴晶体的惠更斯作图法	302
7.5.3 几种特例	303

7.6 晶体光学器件	304
7.6.1 偏振棱镜	304
7.6.2 波片	306
7.6.3 相位补偿器	308
7.7 波片对光的偏振态的改变	309
7.7.1 光在波晶片中的传播引起的相位差	309
7.7.2 经过波片后光的偏振态的改变	311
7.7.3 偏振态的实验鉴定	317
7.8 偏振光的干涉	319
7.8.1 平行偏振光的干涉装置	319
7.8.2 干涉分析与实验现象	319
7.8.3 偏振光干涉的应用——光测弹性	321
7.9 电光效应	322
7.9.1 克尔效应	322
7.9.2 泡克尔斯效应	323
7.9.3 电光效应的应用	325
7.10 旋光	326
7.10.1 自然旋光	326
7.10.2 磁致旋光	331
7.10.3 磁致旋光的应用	332
第8章 光波与物质的相互作用	335
8.1 光的吸收	335
8.1.1 吸收的实验定律	335
8.1.2 吸收系数与波长的关系	336
8.2 光的色散	338
8.3 光的散射	340
8.3.1 散射现象	340
8.3.2 散射定律	340
8.4 强光在介质中的非线性电极化效应	342
第9章 光的量子性	345
9.1 黑体辐射	345
9.1.1 热辐射	345
9.1.2 黑体辐射的实验规律	347
9.2 光量子	352