

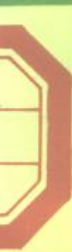
普通物理学教程丛书

光 学

(上册)

潘笃武 贾玉润 陈善华 编著

复旦大学出版社



439454

普通物理学教程丛书

光 学

(上 册)

潘笃武 陈善华 编著
贾玉润



复旦大学出版社

责任校对 马金宝

光 学
(上 册)

编 著 潘笃武 贾玉润 陈善华
出 版 复旦大学出版社
(上海国权路 579 号 邮政编码 200433)
发 行 新华书店上海发行所
印 刷 复旦大学印刷厂
开 本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$
印 张 12.375
字 数 321 000
版 次 1997 年 6 月第 1 版 1997 年 6 月第 1 次印刷
印 数 1—3 000
书 号 ISBN 7-309-01613-0/O · 164
定 价 12.00 元

本版图书如有印订质量问题, 请向承印厂调换。

内 容 提 要

本书是《普通物理学教程丛书》中的一种,是作者们在复旦大学物理系讲授光学课程的讲义基础上修改、发展而成。本书以物理光学为重点,在阐明传统的经典光学的基本概念的基础上,将光学学科的新发展和经典光学的内容结合起来,介绍了光学中的新观念、新思想,并注重光学与物理学其他领域以及高新技术的联系。

全书分上、下两册。上册内容有:光的本性、干涉和衍射、几何光学;下册内容有:傅里叶光学、光的吸收和发射、光的色散和散射、光在晶体中的传播、非线性光学、光的统计性质。

本书可作为高等院校物理类各专业光学课程的教科书或教学参考书,也可供其他有关专业作为参考书。

前 言

这套《普通物理学教程丛书》是我们以历年来在复旦大学物理类专业教学中使用的讲义为基础,经过补充修订、编写而成的。多年来,在我校担任物理课教学的许多同志,曾努力结合教学实践,对普通物理学教材作出了改进。实践表明,这些改进对提高教学质量是有重要作用的。这套丛书的编写也可以说是我们对这些共同的努力所作的一点总结。

普通物理学是很成熟的课程,通行的优秀教材不少;而且很久以来已形成了传统的格式,框架结构已相对稳定,改变的余地似乎不多。但是教学是创造性的工作,每一位教师的讲课都反映了他本人对所教内容的体会、理解、有他自己的讲授方法,会给听课的学生以不同的感受。教材的编写,集中地体现了这些方面不同的风格。正如在绘画、音乐等艺术创作中,同一题材在不同作者手里总是反映出不同的个性特点一样。近几年,各类物理教材的出版,比过去繁荣得多,这不仅为教师提供了更多的选择余地,而且也加强了教学经验的交流,有力地促进了教学的改进和教学质量的提高。我们这套教材在复旦大学出版社的支持下陆续出版,我们认为也是一个学习交流的机会,使我们能把仅在自己学校里实践过的点滴经验,拿到同行老师们和广大读者中来,争取得到大家的帮助、指正,使它们逐步改进和完善。

总的说来,我们在编写过程中力求做到:

1. 重点放在基本概念和基本原理的清楚阐述上。在阐述方法方面,力求由物及理,揭示明确的物理图像(不回避使用学生已学过的数学工具,但在运用新的数学工具时,要特别注意不掩盖物理内容的实质),引导学生注意建立这些原理的实践基础,提高运用它们解决物理问题的兴趣和能力,而不停留在仅仅钻研原理本身。

2. 基本保持传统框架,适当更新题材,注意横向联系。物理学的发展和学科之间的沟通渗透,为普通物理学教学提供了大量新题材和新问题。适当地反映这些情况,使学生能在更广泛的意义上理解物理学的基本内容,是当前物理学教学发展的趋势和要求。在考虑内容更新的同时,也要注意普通物理学课程在物理学教学全局中的位置,注意与其他课程有恰当的分工和衔接。

3. 注意启发学生的思考。使他们对一些问题萌生进一步探讨的兴趣,而不满足于接受现成的知识。

4. 运用近年来物理学教学研究的成果,适当加强过去教学中某些较为薄弱的环节。

5. 适合不同方面的需要。除了供普通物理学课程教材之用外,也可以给教师、学生和其他读者作参考书。书中用小号字或打“*”号的内容和一部分附录就是为这方面的需要而补充的。

当然,就这几方面,我们也深感不容易做好,希望与读者共同切磋,力求继续改进。

这套教材是从集体教学经验中产生的。但各册由不同的作者分头编写,独立成书,因而也反映了各自的教学特点,没有企求整齐划一。前人主张“转益多师”。在科学发展的新形势下,对大学生来说,更有这样的需要。从这一意义上说,让各部分教材保持各自的特点,也许不是没有积极意义的。

丛书的出版得到校内外许多同志的大力支持、帮助,谨在此表示衷心的感谢。

复旦大学物理系普通物理学教研组

1985年4月

作者的话

我们从 60 年代初就开始在复旦大学物理系讲授普通物理光学课程,80 年代初着手编写光学讲义用于光学课程教学,本书就是在这讲义的基础上修改、发展而成的。

自从 1960 年激光问世以来,光学学科飞速发展、日新月异。激光的发展不仅使传统的光学的基础理论面貌更新,并且在物理学和其他学科中注入了新的思想、开创了新的实验方法。在高科技的许多方面激光技术都得到广泛的应用。特别值得一提的是,它在通信和作为新一代计算机器件等方面的应用前景十分令人鼓舞。激光理论和技术已经是光学学科中重要的、不可缺少的组成部分。激光的发明和发展也同样迫使光学课程的体系和内容作相应的改革。为了适应这个新的形势,我们努力在本书中反映光学学科的新面貌,力图将以激光为中心的光学新进展和传统的经典光学内容有机地结合在一起,以新的观点来审视和组织传统的和新的材料。

由于新材料的增加,光学课程的内容势必大大膨胀。这迫使我们改变传统的思想方法,重新审查教材内容。传统内容有些要被删除;有些要被缩减。虽然传统的内容在整个教材中的比例减少了,但这并不意味着基本概念会被削弱。基本概念和基本原理仍然是重要的,必须清楚地予以阐明。不过,有些原理被赋予了新的形式,并增添了新的内涵。我们引用爱因斯坦的一个比喻来说明新老内容的关系:“它倒是像在爬山一样,越是往上爬越能得到新的更宽广的视野,并且越能显示出我们的出发点与其周围广大地域之间的出乎意外的联系。但是我们出发的地点还是在那里,还是可以看得见,不过显得更小了,只成为我们克服种种阻碍后爬上山巅所得到的广大视野中的一个极小的部分而已。”(A·爱因斯坦、L·英费尔德著,物理学的进化,第 96 和 97 页。上海:上

海科学技术出版社,1962年)虽然,这段话原来谈的是关于科学研究中新理论和旧理论的关系,我们觉得用于当前的教材改革也非常合适。

教材体系和内容的改革决不意味着抛弃或削弱原来最基本的原理。因为新发明和新理论都是从原有的基础上发展、生长出来的。新理论的阐述,用新的应用实例代替老的、过时的例子,这非但不削弱教材中基本概念的阐明,相反使读者对基本原理有更深刻的理解。随着科学的进化,人们对基本原理的认识必然更充实、更深入,教材必须跟上这一进化过程。法布里-珀罗干涉仪是传统光学中典型的多光束干涉的实例,它也是重要的光学仪器,传统的光学教材中都要对它详细地讨论。在法布里-珀罗干涉仪的两面高反射率镜片之间放入可放大光束能量的工作物质就成了激光器。激光器中再串联一个法布里-珀罗干涉仪可达到选模的目的。在法布里-珀罗干涉仪的腔中放入非线性光学材料就可制成高速光双稳态器件。全息照相无非是利用光的干涉原理进行记录图像信息,再利用光的衍射原理来再现三维图像。这就实现了光的位相信息的保存和再现。又如,推导夫琅和费衍射的振幅分布的积分公式实质上就是傅里叶变换公式,不过在传统的教科书中不强调这一点罢了。一旦指明并加以发挥就有了全部傅里叶光学的内容。通过傅里叶变换这一数学形式将光的衍射理论和通信理论联系起来,在光学中注入了新的思路和新的意义。以上所举的几个例子都是光的干涉和衍射的基本原理的发展和异化。教材中增添了这些内容,使读者对光的波动性质和位相在光学中的意义有更加深刻的认识。

在现代科学技术中信息的概念越来越显得重要。但是,在普通物理课程中却没有它应有的地位。在光学课程中介绍一下信息和信息处理的概念和方法是恰当的,并且也是必要的。这不仅是因为傅里叶光学的主要应用是光信息处理,光学课程中许多内容都直接或间接牵涉到光波携带的信息的提取和分析。光学之所以会成为一门物理学的分支学科,开始是因为人能看见周围事物,光给人类带来生存和发展所必要的信息。在光学教程中常用振幅平方表示波功率或能量而略去相乘的常数,这是因为光学中的多数课题关心的是光能量在空间中的相对分布而不是能量的绝对值。在光的干涉和衍射的有关问题中,从光能量的空

间分布(干涉或衍射条纹)可以提取出有关光的波长、障碍物大小和形状等信息。传统的光学仪器分辨率的概念已发展为光学传递函数。提高光学分辨率的各种方法实质上是如何在噪声中提取更多的有用信息的方法。全息照相的发明就是想从不够清晰的图像中提取出更多被埋藏着的信息这一思路开始的。几何光学仪器实际上也都是处理和记录图像信息的工具。从光谱仪器得到的光谱可以了解光源的成分和物理性质。在光学课程中适当介绍信息和信息处理的观念和方法是符合科学技术发展现状的。

光学的传统教科书大多将经典的波动光学与量子光学截然分开。这恐怕不是最佳的方案。经典物理学和量子物理学的划分是人为的,自然界自身从不理会这一分割。光是具有波粒二象性统一的物质,波动性和粒子性同时并存。只不过在某些实验条件下用光的波动性就可以满意地解释观察到的现象,在另一些条件下要用光的量子性质才能予以较好的说明罢了。光的波动性和粒子性分别都只是光的本性的近似描述和模型。我们应该给学生以自然界是统一整体的观念,不宜过分人为地将光的二象性机械地割裂。本书在第一章讲述光的本性中,在重点说明光作为电磁波的重要性质的同时也就提出了光的量子性质。在以后各章中仍以经典波动光学为主线,但对于一些用光的粒子性能更简明地说明问题时,我们回避用光的量子性来解释。在适当的时候,我们对同一现象分别用波动性和粒子性作出解释并比较两者的异同,以期加深读者对光的波粒二象性的理解。

在本书中,我们适当加强了光和物质相互作用有关的章节。在现代科学的各个领域中广泛运用光和物质相互作用来研究物质的构造和反应过程。通过对光和物质相互作用的研究也加深了人们对光的本性的认识,开拓了光在高科技中的应用前景。而近年来新编写的有些光学教科书在光和物质相互作用的内容方面比 50 年代常用的教科书反而显得更弱了。我们想改变这一状况。在本书中我们增加了非线性光学一章。自然界的过程本来就不能只用线性方程描述的。用线性方程描述自然过程仅仅是一种近似。近几十年来,由于实验技术的进步,自然界中各种非线性现象变得特别醒目,光的非线性特点也因激光的应用而

显得更为重要。回顾一下传统的教科书,泡克耳斯效应、克尔效应和旋光现象等等都是非线性光学现象。我们把上述内容加上新的材料重新组织,成为非线性光学一章。这样一来,虽然讨论的是同样的一些现象和效应,但是观点提高了、与最新的科学技术联系起来了。在编写非线性光学这一章的过程中,我们坚持了普通物理课程的特点,即从实验现象出发,从普通物理光学课程中最基本的物理量——折射率的非线性所产生的现象的介绍开始,然后引伸到非线性产生的机理。但我们只限于简单的、半定量的数学模型,而不追求严格解,因为这不是普通物理课程的任务。

在本书的编写过程中,我们力求做到着重阐明物理思想,注意光学在整个物理学中的位置以及光学和其他科学学科的联系。我们编写了光的统计性质一章。这不仅是因为光场本质上是随机场,光的相干性问题发生的根本原因就在于此;还因为统计规律是自然界的根本规律,它无时无刻不在起作用。在关于黑体辐射的讨论中,我们一方面阐明黑体辐射的原理在光学中的意义,也联系到对黑体辐射的研究在物理学的其他领域中的作用,由它产生的物理学新思想。在叙述费马原理时,强调指出由于费马原理和哈密顿原理相似,启发了德布罗意提出物质波的假设。又如,在干涉一章中也介绍了声波的干涉和微波的干涉,表明了各种波动的共性。

傅里叶变换的数学方法在本书中多次遇到,特别是在傅里叶光学一章中它是主要的数学方法。我们为了尽量突出物理思想,这一章的叙述方法也有特色。我们不用繁复的数学去推导透镜的傅里叶变换性质,而从光学中常用的、也是基本的光栅衍射图样和傅里叶频谱比较开始,引出光学中空间频谱的概念。再列举几个读者已经熟悉的例子,一方面说明空间频谱就是夫琅和费衍射,一方面阐明傅里叶光学的概念。然后,我们详细讨论空间频率的物理意义,这在其他教科书中是不多见的。这样做的目的是,不至于使读者只顾及数学公式而忽略了其中的物理思想。

在本书中对光学的各种应用也给予了足够的重视。例如,第二章中用块规干涉仪作为例子,这是一种经典的、高精度的光学测量方法。在

许多章节中我们都安排了适当的应用实例。光学仪器和方法在现代科学实验和高技术中已经有广泛的应用,它的用途还会进一步扩大。

总而言之,我们努力将本书写成开放式。所谓开放式,一是不把光学课程构成为封闭系统,而是作为物理学的一部分;二是介绍科学的新发展。不可能也不打算讲透所有问题,只给读者打开窗户,让读者看到还有更广阔的天地,等待有志者去开发。

最后,我们感谢在本书的写作中支持和帮助过我们的老师和同事。在我们和章志鸣教授共事和探讨问题的过程中受到很大的教益,本书编写的指导思想有的是章志鸣教授最先提出的,有的是在共同讨论中逐渐形成的。我们还始终得到蔡怀新教授的支持与鼓励,他的教学经验和教学改革思路对我们有很大的影响。蔡怀新教授还审阅了本书全部书稿,给我们很大的帮助。沈启舜、吴中亚、柯国庆、梁丽芬、陈璧耀和王祖彝等同志曾与我们合作,并帮助我们修改讲义、选定习题等。

作 者

1995 年于复旦大学

目 录

(上 册)

前 言

作者的话

第一章 光的本性	1
§ 1.1 波和粒子	1
§ 1.2 波 动	3
一、简谐波的表达式	3
二、波动方程	5
三、纵波与横波	7
§ 1.3 电 磁 波	8
一、电磁波方程和它的简谐波解	8
二、电磁波的性质	11
三、光的波粒二象性	15
§ 1.4 电磁波的能量	16
一、辐 照 度	16
二、高斯光束	17
三、电磁波的能量流和光子	18
§ 1.5 光的动量和压强	21
一、电磁波的动量	21
二、光 压	22
* 三、激光束的压力	24
§ 1.6 三维空间中的标量波	25
一、三维空间中的平面波	25

二、球面波	27
§ 1.7 叠加原理	28
一、叠加原理	28
二、相同频率振动的叠加和矢量图解法	29
§ 1.8 惠更斯原理	31
§ 1.9 费马原理	34
§ 1.10 光通过介质界面时的反射和折射	41
一、光波频率在反射和折射前后不变	42
二、反射定律和折射定律	43
三、菲涅耳公式	44
四、布儒斯特角	46
五、反射比和透射比	48
六、反射光的位相变化	53
§ 1.11 斯托克斯关系式	55
§ 1.12 内反射	56
一、全反射	56
二、反射光的位相	57
三、平面平行透明板前后界面反射波的位相关系	59
* 四、消逝波	61
* § 1.13 光的多普勒效应	65
思考题与习题	68
参考读物	73

第二章 光的干涉 75

§ 2.1 杨氏实验	75
一、实验装置和干涉现象	75
二、杨氏干涉条纹的分布规律	77
§ 2.2 光波的相干条件	80
一、干涉的一般考虑	80
二、可见度	82
三、两列平面波的干涉	83
四、两列球面波的干涉	84
§ 2.3 几种分波前干涉装置和瑞利干涉仪	85

一、分波前干涉装置	85
二、瑞利干涉仪	87
§ 2.4 薄膜干涉	89
一、坡耳实验	89
二、等倾干涉	90
三、等厚干涉	94
四、薄膜的颜色	96
五、条纹定域的讨论	98
六、等厚条纹和等倾条纹	100
§ 2.5 等厚干涉的应用	100
一、校准块规	100
二、检查光学表面的质量	101
三、斐索干涉仪	102
四、牛顿环	103
* 五、块规干涉仪	105
§ 2.6 迈克耳孙干涉仪	108
一、结构和原理	108
二、干涉条纹	109
三、复色光源	111
* 四、迈克耳孙-莫雷实验	112
* 五、拍频干涉仪	114
* § 2.7 其他几种干涉仪	115
一、特怀曼-格临干涉仪	115
二、激光自动比长仪	116
三、沙拿克干涉仪	117
§ 2.8 光的相干性	121
一、光的单色性	121
二、相干长度	123
三、薄膜的厚度	125
四、光源大小对干涉条纹可见度的影响	126
五、空间相干性	127
六、干涉条纹的定域和空间相干性	128
思考题与习题	129

参考读物	136
------------	-----

第三章 多光束干涉和薄膜光学..... 138

§ 3.1 多个相干点光源发射相干光的干涉..... 138

一、多光束干涉原理..... 138

* 二、相控阵雷达..... 142

* 三、声波干涉..... 145

四、例 题..... 145

§ 3.2 多光束干涉装置..... 147

一、两平行平面间多次反射光的干涉..... 147

二、法布里-珀罗干涉仪

三、干涉滤光片..... 157

§ 3.3 激光谐振腔..... 158

一、激光谐振腔原理..... 158

二、纵 模..... 162

* 三、选 模..... 163

§ 3.4 单层介质薄膜的光学性质..... 164

一、光在界面上的反射和透射..... 165

二、单层介质薄膜的反射..... 167

三、单层增透膜..... 169

四、单层增反膜..... 172

* 五、膜厚监控..... 174

*§ 3.5 多层介质薄膜的光学性质

一、双层薄膜系统..... 175

二、多层薄膜系统..... 177

三、干涉滤光片..... 180

*§ 3.6 介质薄膜的特征矩阵

一、单层介质薄膜的特征矩阵..... 182

二、多层介质薄膜的特征矩阵..... 185

思考题与习题

参考读物

第四章 光的衍射	194
§ 4.1 光的衍射现象.....	194
§ 4.2 惠更斯-菲涅耳原理	197
§ 4.3 夫琅和费单缝衍射.....	200
一、实 验.....	200
二、讨 论.....	202
三、积分方法计算光强分布.....	207
§ 4.4 夫琅和费矩孔衍射和圆孔衍射.....	210
一、矩形孔衍射.....	210
二、圆孔衍射.....	212
* 三、互补屏原理.....	216
四、高斯光束的形成.....	218
§ 4.5 光学系统的分辨率	219
一、瑞利判据.....	219
二、提高分辨率的途径.....	222
* 三、综合孔径.....	223
* 四、变 迹.....	226
§ 4.6 夫琅和费双缝衍射.....	229
一、一般分析.....	229
二、衍射图样光强分布的定量讨论.....	232
三、积分法求光强分布.....	233
§ 4.7 衍射光栅.....	234
一、光栅衍射图样的光强分布规律.....	234
二、色 散.....	237
三、分 辨 率.....	239
四、反射光栅和闪耀光栅.....	240
§ 4.8 菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射.....	242
一、菲涅耳波带.....	242
二、振幅矢量法讨论 P 点的振动	246
三、菲涅耳圆孔衍射.....	247
四、圆形障碍物的菲涅耳衍射.....	249

五、菲涅耳波带片	250
*§ 4.9 菲涅耳衍射和夫琅和费衍射的条件	253
*§ 4.10 光子和衍射实验	256
思考题与习题	259
参考读物	263

第五章 几何光学的近轴理论..... 266

§ 5.1 波面变换与光线的传播	266
一、波面与光线	266
二、球面波在参考平面上的复振幅表示	268
三、单折射球面对球面波的变换	270
§ 5.2 光线在球面上的折射	274
一、符号法则	274
二、球面折射成像公式	275
三、放大率	277
四、成像作图法	279
五、光线在平面上的折射	282
* 六、球面折射的不晕点	284
七、例题	285
§ 5.3 共轴球面系统	289
一、主点和焦点	290
二、共轴球面系统的成像公式	292
三、节点	293
四、求两个球面组成的共轴系统的基点	295
五、透 镜	297
六、薄透镜组成的系统	298
七、例 题	300
*§ 5.4 几何光学的矩阵方法	302
一、折射矩阵	302
二、系统矩阵	303
三、物像矩阵	306
四、例 题	308
*§ 5.5 激光谐振腔的稳定性	312