

高等学校试用教材

光学教程

姚启钧 原著

华东师大《光学》教材编写组 改编

郑一善 校



人民教育出版社

内 容 提 要

本书是在华东师大物理系姚启钧教授所编讲义的基础上,根据1980年部颁教学大纲及该校历年教学实践重新整理改编而成的。

本书内容包括经典光学的主要原理和应用,并适当介绍了现代光学的发展。全书共九章:光的干涉,光的衍射,几何光学的基本原理,光学仪器的基本原理,光的偏振,光的传播速度,光的吸收、散射和色散,光的量子性,现代光学基础。有些公式的数学推导作为附录列于各章之末,每章末配有适当的例题及习题。全书讲授份量约为72学时。

本书经江苏师院等十所院校审查,可作为高等师范院校物理专业的试用教材,也可作为综合大学、高等工科院校等有关专业的教学参考书,并可供中学物理教师及其他有关人员参考。

本书由华东师大《光学》教材编写组整理改编,具体分工为:宣桂鑫(绪论、第一、二、四、六、七、章,附录及全书统稿),赵玲玲(第三、五、八章),徐志超(第九章),蒋可玉(例题、习题并参加统稿),并由郑一善教授校阅。

本书责任编辑:邹延肃。

高等学校试用教材

光 学 教 程

姚启钧 原著

华东师大《光学》教材编写组 改编

郑一善 校

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

外文印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 16.75 插页 2 字数 400,000

1981年6月第1版 1981年12月第1次印刷

印数 00,001—30,500

书号 13012·0556 定价 1.50元

序 言

光学是普通物理学的一个重要组成部分,是研究光的本性、光的传播和光与物质相互作用的基础学科,它和原子物理、电动力学和量子力学等后继课程有密切的关系,激光的出现和发展,使光学的研究进入一个崭新的阶段,成为现代科学技术前沿阵地之一。

本书内容包括经典光学的主要原理和应用,并适当介绍了现代光学的发展。全书共九章,分五大部分:第一、第二、第五和第六章,主要讨论波动光学;第三和第四章,主要讨论几何光学;第七章讨论光的吸收、散射和色散;第八章主要讨论光的量子性。最后在第九章介绍了现代光学基础。此外,在绪论中还介绍了光学发展简史,以有助于培养学生的辩证唯物主义世界观。

本书是按照波动光学、几何光学、光的量子性和现代光学基础的次序安排的。波动光学放在最前面,是为了强调光的电磁本性,并考虑到和普通物理电磁学的衔接。这样处理,可将几何光学作为波动光学的近似和特例进行讨论,有助于从光的电磁本性来理解几何光学的内容。关于波动光学教学中所涉及的几何光学内容,可充分运用学生已具备的中学几何光学知识。使用本书时,也可以将几何光学放在最前面讲授,这时,可将光程的概念提前到几何光学中介绍,而把光学仪器的分辨本领部分放到衍射这一章中。

为了适应各校不同的需要,突出基本内容,某些章节采用小字排印并在标题上用星号(*)标明。所有这些章节可机动使用,也可作为读者进一步学习的参考。本书各章的若干附录,介绍了某些公式的数学推导,不作为必要掌握的内容,只供教学上参考。为了启发学生思维和巩固所学的知识,在各章末安排了一些例题和习题。

本书的原稿是华东师范大学物理系姚启钧教授于1965年根据教育部的委托，在他多年使用的讲义基础上编写而成的。不幸他在1966年惨遭迫害去世，现在只能由我们——他的学生来继续完成他未竟的工作，这也是对他最好的纪念。这次整理、改编是根据1980年6月高等学校理科物理教材编审委员会审定的高等师范院校物理专业《普通物理学(光学)教学大纲》的基本要求，并参考了近年来国内外有关资料及我校的教学实践经验，在郑一善教授指导下进行的，最后由郑一善教授校阅了全书。

整理、改编工作的分工如下：

绪论、第一、二、四、六、七章和附录等由宣桂鑫同志整理改编；第三、五和八章由赵玲玲同志整理改编；第九章由徐志超、沈珊雄同志整理改编，蒋可玉同志根据光学学习指导书，整理和核算了全书的例题和习题。宣桂鑫、蒋可玉统稿。

在一九八〇年一月本教材的审稿会上，江苏师范学院(主审)、东北师范大学、陕西师范大学、安徽师范大学、四川大学、贵州大学、华中师范学院、华南师范学院、江西师范学院和上海师范学院和人民教育出版社等单位的同志提出了不少宝贵的修改意见。特别是在审查修改和定稿过程中，东北师大光学教研室、江苏师范学院凌德洪付教授、华东师范大学袁运开付教授、山东海洋学院于良同志和人民教育出版社邹延肃、胡南琦及其他不少同志给予了热心指导。并对我们提供了许多宝贵意见和帮助，我们在此一并表示衷心的感谢。

由于时间匆促，限于我们的水平，书中定有不少缺点、遗漏或错误，恳请广大教师和读者不吝指正。

华东师大《光学》教材编写组

一九八一年一月

教学说明

现将各章的教学要求说明如下:

一、光的干涉

1. 着重阐明光的相干条件和掌握光程的概念. 分析双光束干涉时, 应着重分析光强分布的特征.

2. 着重阐明等倾干涉和等厚干涉的基本概念及其应用. 条纹定域问题不作分析. 额外程差只提形成的条件.

3. 介绍迈克耳孙干涉仪和法布里—珀罗干涉仪的原理及其应用, 分析法布里—珀罗干涉仪时, 应突出多光束干涉的特点.

4. 扼要介绍薄膜光学的内容.

5. 时间相干性和空间相干性的概念, 可放在现代光学基础“激光的相干性”中讨论.

6. 运用菲涅耳公式解释半波损失这部分内容是难点, 作机动处理, 但菲涅耳公式需要介绍.

二、光的衍射

1. 本章围绕惠更斯—菲涅耳原理, 讲授菲涅耳积分表式的意义.

2. 着重阐明夫琅和费单缝衍射和衍射光栅. 运用解析法推导夫琅和费单缝衍射光强公式. 扼要介绍反射光栅.

3. 着重阐明光栅方程的导出及其意义.

4. 运用振幅矢量合成图介绍菲涅耳衍射时, 圆孔、圆屏和直边中可任选一种, 但应着重介绍环状波带片.

5. 讲授夫琅和费圆孔衍射的强度公式时只提结论, 着重说明第一最小值所在位置的重要性.

三、几何光学的基本原理

1. 阐明光线、实象、虚象和虚物等概念。
2. 由费马原理导出折射定律。
3. 着重阐明薄透镜的物象公式和任意光线的作图成象法, 这些内容应配合习题课加强基本训练。
4. 几何光学的符号法则采用新笛卡儿符号法则。
5. 着重叙述基点、基面的物理意义。
6. 扼要介绍光学纤维的构造及其应用。

四、光学仪器的基本原理

1. 本章围绕衡量光学仪器特性的三个本领进行教学, 其中着重阐明放大本领和分辨本领(包括象和色分辨本领), 扼要介绍聚光本领。
2. 在典型的光学仪器中, 着重介绍望远镜和显微镜。并叙述数值孔径和相对孔径的意义。
3. 光度学中主要介绍光通量、亮度和照度的概念。
4. 象差概论中主要介绍球差和色差及其校正方法。

五、光的偏振

1. 阐明惠更斯作图法, 说明光在晶体中传播的规律。
2. 叙述布儒斯特定律和马吕定律。
3. 阐明自然光、平面偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光的概念及其检定方法。
4. 叙述 $\frac{1}{4}$ 波片的功用。

5. 干涉、衍射和偏振都是波动光学的主要内容, 在讨论光的本性时, 必须把它们联系在一起。由于通常的光学仪器大部分都与成象和摄谱有关, 所以在前四章之后紧接介绍它们在光学仪器中的应用, 巩固所学概念, 然后再学习偏振。这样安排还考虑到偏振现象比较不易观察, 涉及到各向异性的晶体等, 初学者比较难于

接受。在实际教学中完全可以根据具体情况加以适当调整。

六、光的传播速度

1. 介绍一、二种经典的和近代的测量光速的方法。
2. 着重叙述群速度的概念。

七、光的吸收、散射和色散

定性介绍光的吸收、散射和色散的经典解释。

八、光的量子性

着重叙述光的量子性和主要实验证据——光电效应和康普顿效应。

九、现代光学基础

1. 重点叙述亚稳态能级, 受激发射光激励, 粒子数反转, 光振荡等基本概念。

2. 在激光器的种类这一节中, 简单介绍红宝石激光器, He—Ne 激光器和可调谐染料激光器。

3. 结合电极化矢量扼要介绍非线性光学及其应用。

4. 定性解释全息照相的基本原理。

5. 扼要介绍空间频率、空间滤波等傅里叶光学的几个基本概念, 供深入学习时参考。

目 录

序言.....	1
教学说明.....	1

绪 论

§ 0—1 光学的研究内容和方法.....	1
§ 0—2 光学发展简史.....	2

第一章 光的干涉

§ 1—1 光的电磁理论.....	12
§ 1—2 波动的独立性、迭加性和相干性.....	15
§ 1—3 由单色波迭加所形成的干涉花样.....	19
§ 1—4 获得相干光源的方法.....	25
§ 1—5 菲涅耳公式.....	34
§ 1—6 光照射到介质薄膜时的干涉(等倾和等厚干涉).....	39
§ 1—7 迈克耳孙干涉仪.....	48
§ 1—8 法布里-珀罗干涉仪.....	51
§ 1—9 干涉现象的一些应用.....	58
附录 1—1 振动迭加的三种计算方法.....	63
附录 1—2 简谐波的表达式.....	65
附录 1—3 菲涅耳公式的推导.....	66
附录 1—4 额外程差.....	69
附录 1—5 有关法布里-珀罗干涉仪的(1—27)式的推导.....	72
附录 1—6 有同一位相差的多光束的迭加.....	73
例 题.....	75
习 题.....	80

第二章 光的衍射

§ 2—1 光的衍射现象.....	82
§ 2—2 惠更斯-菲涅耳原理.....	84
§ 2—3 菲涅耳半波带.....	87
§ 2—4 菲涅耳衍射(圆孔和圆屏).....	91
§ 2—5 菲涅耳直边衍射*.....	98

§ 2—6	夫琅和费单缝衍射	101
§ 2—7	夫琅和费圆孔衍射	109
§ 2—8	平面衍射光栅	113
§ 2—9	晶体对伦琴射线的衍射	124
附录 2—1	夫琅和费单缝衍射次波的迭加	129
附录 2—2	夫琅和费圆孔衍射次波的迭加	130
附录 2—3	平面光栅衍射次波的迭加	133
例 题		135
习 题		136

第三章 几何光学的基本原理

§ 3—1	光线的概念	139
§ 3—2	费马原理	140
§ 3—3	单心光束 实象和虚象	143
§ 3—4	光在平面界面上的反射和折射 光学纤维	146
§ 3—5	光在球面上的反射和折射	153
§ 3—6	光连续在几个球面界面上的折射 虚物的概念	161
§ 3—7	透镜	164
§ 3—8	薄透镜主轴上物点和象点之间的等光程性*	169
§ 3—9	近轴物点近轴光线成象的条件	171
§ 3—10	理想光具组的基点和基面	176
§ 3—11	一般理想光具组的作图求象法和物象公式	180
§ 3—12	共轴光具组基点基面位置的确定*	186
附录 3—1	图 3—6 中 P_1 和 P' 点坐标的计算	191
附录 3—2	棱镜最小偏向角的计算	193
附录 3—3	物象两点间等光程性的证明	194
附录 3—4	球面反射时物象之间光程的计算	195
例 题		196
习 题		203

第四章 光学仪器的基本原理

§ 4—1	助视仪器的放大本领	209
§ 4—2	目镜	212
§ 4—3	显微镜的放大本领	215

§ 4—4	望远镜的放大本领·····	217
§ 4—5	光瞳·····	223
§ 4—6	光能量的传播·····	228
§ 4—7	光度学单位*·····	235
§ 4—8	物镜的聚光本领·····	237
§ 4—9	幻灯机的聚光和成象*·····	244
§ 4—10	单色象差概述·····	246
§ 4—11	正弦定理和正弦条件*·····	253
§ 4—12	近轴物近轴光线成象的色差·····	256
§ 4—13	助视仪器的分辨本领·····	260
§ 4—14	分光仪器的分辨本领·····	266
例 题	·····	270
习 题	·····	273

第五章 光的偏振

§ 5—1	自然光与偏振光·····	275
§ 5—2	反射和折射时的偏振·····	278
§ 5—3	光通过单轴晶体时的双折射现象·····	284
§ 5—4	对双折射现象的解释·····	288
§ 5—5	晶体中波面的传播·····	290
§ 5—6	偏振仪器·····	294
§ 5—7	椭圆偏振光和圆偏振光·····	298
§ 5—8	偏振光的实验检定·····	302
§ 5—9	偏振光的干涉·····	305
§ 5—10	人工双折射*·····	311
§ 5—11	平面偏振光振动面的旋转*·····	315
§ 5—12	偏振态的矩阵表述* 琼斯矢量和琼斯矩阵*·····	321
附录 5—1	从渥氏棱镜出射的两束平面偏振光夹角公 式(5—6)的推导·····	328
例 题	·····	329
习 题	·····	331

第六章 光的传播速度

§ 6—1	测定光速的天文学方法*·····	333
-------	------------------	-----

§ 6—2	测定光速的实验室方法	335
§ 6—3	光源的运动对光速的影响*	345
§ 6—4	光的相速度和群速度	348
例 题		355
习 题		357

第七章 光的吸收、散射和色散

§ 7—1	分子光学的基本概念	358
§ 7—2	光的吸收	362
§ 7—3	光的散射	366
§ 7—4	光的色散	373
§ 7—5	色散方程*	381
§ 7—6	整个电磁波谱各波段的色散*	383
附录 7—1	亥姆霍兹方程的推导	386
例 题		389
习 题		391

第八章 光的量子性

§ 8—1	热辐射 基尔霍夫定律	392
§ 8—2	黑体的经典辐射定律	396
§ 8—3	普朗克辐射公式 能量子	400
§ 8—4	热辐射定律的应用*	401
§ 8—5	光电效应	403
§ 8—6	爱因斯坦的量子解释	407
§ 8—7	康普顿效应	410
§ 8—8	光压*	415
§ 8—9	德布罗意波*	416
§ 8—10	波粒二象性	420
附录 8—1	从维恩定律(8—7)式推导位移定律	423
附录 8—2	从普朗克公式推导斯忒藩—玻尔兹曼定律	424
附录 8—3	从普朗克公式推导维恩位移定律	424
例 题		425
习 题		426

第九章 现代光学基础

§ 9—1	原子发光的机理	428
§ 9—2	光与原子相互作用	431
§ 9—3	粒子数反转	436
§ 9—4	光振荡	442
§ 9—5	激光的单色性	448
§ 9—6	激光的相干性	457
§ 9—7	激光器的种类*	462
§ 9—8	非线性光学*	469
§ 9—9	全息照相	476
§ 9—10	傅里叶光学的几个基本概念*	483
§ 9—11	阿贝成像原理*	490
§ 9—12	阿贝—波特实验和空间滤波*	495
附录 9—1	傅里叶变换	496
附录 9—2	单色光波复振幅的展开	497
例 题		498
习 题		499

参 考 资 料

主要参考书目	500
附表	501
一、基本物理常数表	501
二、常用波长表(夫琅和费线)	503
三、常用晶体及光学玻璃的折射率表	504
四、液体折射率表(对 5893 Å)	504
五、晶体的折射率 n_o 和 n_e 表(对 5893 Å)	505
六、常用激光器波长表	505
习题答案	507
汉英词汇索引	510

照 相 图

1. 杨氏双缝干涉花样 (§ 1—4)
2. 迈克耳孙干涉仪 (§ 1—7)
3. 迈克耳孙干涉仪的干涉花样 (§ 1—7)

4. 法布里—珀罗标准具的干涉花样(§ 1—8)
5. 空气薄膜厚度不同形成的环状干涉花样(§ 1—9)
6. 菲涅耳圆孔衍射花样(§ 2—4)
7. 菲涅耳直边衍射花样(§ 2—5)
8. 夫琅和费单缝衍射花样(普通光源)(§ 2—6)
9. 夫琅和费单缝衍射花样(He—Ne 激光光源)(§ 2—6)
10. 夫琅和费圆孔衍射花样(§ 2—7)
 - (a) 普通光源
 - (b) He—Ne 激光光源
11. 会聚光通过晶体时的干涉花样(§ 5—9)
 - (a) 尼科耳正交
 - (b) 尼科耳平行
12. 在不同压强下钠蒸汽的反常色散(§ 7—4)
13. 电子射线通过金箔时的衍射花样(§ 8—9)
14. 激光的各种横向模式(§ 9—6)
15. 可调谐染料激光器的实验装置(§ 9—7)
16. 全息照相实验装置(§ 9—9)
17. 由网格形成的频谱(§ 9—12)
 - (a) 网格
 - (b) 频谱
18. 水平狭缝滤波器形成的象(§ 9—12)
 - (a) 频谱
 - (b) 象
19. 网格的象及其对比度反转(§ 9—12)
 - (a) 网格的象
 - (b) 对比反转的网格象

绪 论

§0—1 光学的研究内容和方法

光学的研究内容十分广泛,它包括光的发射、传播和接收等规律,光和其它物质的相互作用(如光的吸收、散射和色散,光的机械作用和光的热、电、化学和生理效应等),光的本性问题以及光在生产和社会生活中的应用。光学既是物理学中最古老的一门基础学科,又是当前科学领域中最活跃的前沿阵地之一,具有强大的生命力和不可估量的发展前途。在讨论中我们可以把它分成几何光学、波动光学、量子光学和现代光学四大部分。学好光学,既能为物理系学生进一步学习原子物理、相对论、量子力学等课程准备必要的前提条件,又有助于我们进一步探讨微观和宏观世界的联系与规律,并把这些规律用于祖国的社会主义现代化建设中去。

光学的发展过程,是人类认识客观世界的历史长河中一个重要的组成部分。是不断揭露矛盾和克服矛盾、从不完全和不确切的认识逐步走向较完善和较确切认识的过程。它的不少规律和理论是直接 from 生产实践中总结出来的,也有相当多的发现来自长期的系统的科学实验。因此,生产实践和科学实验是推动光学发展的强大动力,为光学发展提供了丰富的源泉。

光学的发展为生产技术提供了许多精密、快速、生动的实验手段和重要的理论依据;而生产技术的发展,又反过来不断向光学提出许多要求解决的新课题,并为进一步深入研究光学准备了物质条件。因此,同其它自然科学一样,光学与生产实践的关系生动地体现了理论和实践的辩证法。

从方法论上看,作为物理学的一个重要学科分支,光学研究的发展也完全符合如下的认识规律:在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象和综合,进而提出假说,形成理论,并不断反复经受实践的检验。例如围绕“光的本性是什么”的根本问题,古往今来,人们就是遵循着实验——假说——理论——实验这条道路曲折前进的。这样,一方面,正确的理论对实践具有指导作用;另一方面,理论通过实践又获得进一步的发展。这些我们从下述光学发展简史中可以清楚地看到。

§ 0—2 光学发展简史

光学的发展大致可划分为下列五个时期:

- 一、萌芽时期;
 - 二、几何光学时期;
 - 三、波动光学时期;
 - 四、量子光学时期;
 - 五、现代光学时期。
- 一、萌芽时期

光学的起源应追溯到远古时代。我国春秋战国之际,墨翟(公元前 468~376 年)及其弟子所著《墨经》中,就记载着关于光的直线传播(影的形成和针孔成象等)和光在镜面(凹面和凸面)上的反射等现象,并提出了一系列经验规律,把物和象的位置与大小与所用镜面的曲率联系起来。无论就时间还是就科学性来讲,《墨经》称得上是有关光学知识的最早记录。比墨经大约迟一百多年,在希腊数学家欧几里德(Euclid,公元前 330~275 年)所著的《光学》一书中,研究了平面镜成象问题,指出反射角等于入射角的反射定律,但他却同时提出了将光当作类似触须的投射学说。

从墨翟开始的二千多年的漫长岁月构成了光学发展的萌芽时期，它是光学发展史上一段缓慢前进的年代。除了对光的直线传播、反射和折射等现象的观察和实验外，在生产和生活需要的推动下，在光的反射和透镜的应用方面，逐渐有些成就。克莱门德 (Cleomedes, 公元 50 年) 和托勒密 (C. Ptolemy, 公元 90~168 年) 研究了光的折射现象，最先测定了光通过两种介质分界面时的入射角和折射角。罗马哲学家塞涅卡 (Seneca, 公元前 3 年~公元 65 年) 指出充满水的玻璃泡具有放大性能。从阿拉伯的巴斯拉来到埃及的学者阿尔哈金 (Alhazen, 公元 965~1038 年) 反对欧几里德和托勒密关于眼睛发出光线才能观察物体的学说，认为光线来自所观察的物体，而光是以球面形式从光源发出的；反射线和入射线共面且入射面垂直于界面；他研究过球面镜和抛物面镜，并详细描绘了人眼的构造；他首先发明了凸透镜，并对凸透镜进行了实验研究，所得的结果接近于近代关于凸透镜的理论。公元十一世纪，我国宋代的沈括 (1031~1095 年) 在《梦溪笔谈》中记载了极为丰富的几何光学知识，他不仅总结了前人研究的成果，而且对凹面镜、凸面镜的成象规律、测定凹面镜焦点的原理以及虹的成因等方面都有创造性的阐述。培根 (R. Bacon, 公元 1214~1294 年) 提出用透镜校正视力和采用透镜组构成望远镜的可能性，并描述过透镜焦点的位置。阿玛蒂 (Armati, 公元 1299 年) 发明了眼镜。波特 (G. B. D. Porta, 公元 1535~1615 年) 研究了成象暗箱，并在 1589 年的论文《自然的魔法》中讨论了复合面镜以及凸透镜和凸透镜的组合。综上所述，到十五世纪末和十六世纪初，凹面镜、凸面镜、眼镜、透镜以及暗箱和幻灯等光学元件已相继出现。

二、几何光学时期

这一时期可以称为光学发展史上的转折点。在这时期建立了光的反射定律和折射定律，奠定了几何光学的基础。同时为了扩

大人眼的观察能力出现了光学仪器，第一架望远镜的诞生促进了天文学和航海事业的发展，显微镜的发明使生物学的研究有了强有力的工具。

荷兰李普塞(H. Lippershey, 1587~1619年)在1608年发明了第一架望远镜。十七世纪初延森(Z. Janssen, 1588~1632)和冯特纳(P. Fontana, 1580~1656年)最早制作了复合显微镜。1610年伽里略(1564~1642年)用自己制造的望远镜观察星体，发现了绕木星运行的卫星，这给哥白尼关于地球绕日运转的日心说提供了强有力的证据。

开普勒(1571~1630年)汇集了前人的光学知识，于1611年发表了著作《折光学》，无论在形式上和内容上，该书都可与现代几何光学教本媲美。他提出了用点光源照明时，照度与受照面到光源距离的平方成反比的照度定律。他还设计了几种新型的望远镜，特别是用两块凸透镜构成的开普勒天文望远镜。他还发现当光以小角度入射到界面时，入射角和折射角近似地成正比关系。至于折射定律的精确公式则是斯涅耳(W. Snell, 1591~1626年)和笛卡儿(R. Descartes, 1596~1650年)提出的。1621年斯涅耳在他的一篇未发表的文章中指出，入射角的余割和折射角的余割之比是常数，而笛卡儿约在1630年在《折光学》(1637年出版)中给出了我们现在熟悉的用正弦函数表述的折射定律。接着费马(P. de Fermat, 1601~1665年)在1657年首先指出光在介质中传播时所走路程取极值的原理，并根据这个原理推出光的反射定律和折射定律。综上所述，到十七世纪中叶，基本上已经奠定了几何光学的基础。

早先关于光的本性的概念，是以光的直线传播观念为基础的。但从十七世纪开始，就发现有与光的直线传播不完全符合的事实。意大利人格里马第(F. M. Grimaldi, 1618~1663年)首先观察到