



普通高等教育“十二五”规划教材



© 王文军 张山彪 杨兆华 主编

光学



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

光 学

王文军 张山彪 杨兆华 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是山东省精品课程的配套教材,是按照教育部《高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》和《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》的要求,结合地方综合大学和高等师范院校光学教学的特点及其实际情况编写而成的。根据“厚基础、宽口径、大综合”的育人要求,本书汇集了近10年聊城大学、泰山学院、山东师范大学、曲阜师范大学、济南大学、济宁学院、山东理工大学等17所高校光学教学改革的新成果、新经验,并配有实验教材、电子教案、网络课程等,是新体系、立体化的光学教材。

本书适应56~72学时的教学安排,可作为地方综合大学、师范院校、高职高专学校物理学、应用物理学、物理学教育、光信息科学与技术及相近理工科专业学生的教材或参考书,适合不同层次的教学需要,书中带“*”的内容为选学部分,也可供其他专业学生和感兴趣的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光学/王文军等主编. —北京:科学出版社,2011

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-031890-9

I. ①光… II. ①王…②张…③杨… III. ①光学-高等学校-教材

IV. ①O43

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第144431号

责任编辑:窦京涛 唐保军/责任校对:朱光兰

责任印制:张克忠/封面设计:北京蓝正广告设计有限公司

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2011年7月第一次印刷 印张:25 1/2

印数:1—3 000

字数:515 000

定价:43.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

新编著的这套“光学”教材是适应 21 世纪要求的新体系、立体化教材,是按照教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》和《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》的要求,结合地方综合大学和高等师范院校光学教学的特点及其实际情况,根据“厚基础、宽口径、大综合”的育人要求,按照系列文本教材、配套教学课件、网络课程三大部分编写而成。同时,也是我们正在建设的山东省精品课程的配套教材。

本书由聊城大学、泰山学院、山东师范大学、曲阜师范大学、济南大学、济宁学院、山东理工大学、烟台大学、宁波大学、鲁东大学、九江学院、黑河学院、潍坊学院、菏泽学院、滨州学院、枣庄学院、运城学院联合编写,编写的原则和特色如下:

(1)按照教育部和山东省教育厅关于精品课程的建设要求,贯彻以人为本的教育教学理念,构筑高水平、科学化与规范化的光学课程新体系,即内容新、方法新、手段新、体系新、适用性强、具有信息时代特色的光学课程新体系。具体有立体化新体系“光学”主教材和配套的光学实验教材——“基础物理实验”以及“大学物理实验”教材、网络课程、电子教案、CAI 课件、教学指导书、试题库、名人轶事、师生互动在线学习平台、教学大纲、立体化新体系“光学”课程考核与测评体系等。

(2)紧密结合地方综合大学立体化教学和分层次教学与高等师范院校的办学特点,以及学生考研呼声较高的实际情况,力求物理概念准确,图像清晰,取材新颖,数学运算简洁,逻辑体系严谨。全书包括几何光学、光度学概要、光学仪器、光波场的描述、光的干涉、光的衍射、光的偏振、光与物质的相互作用、光的量子性、现代光学概述等内容,各章都适当增加了一些例题与习题。

(3)正确把握 21 世纪光学教学改革的方向,力求将光学发展的最新成就与光学教学改革的最新成果融于基本概念、基本理论的阐述中,做到既系统透彻地阐述光学的基本概念、基本规律、分析方法及其重要应用,又将理论与实际、经典与现代、基础与前沿完美地结合起来。力求以光的本性为主线,引导学生学习光学,便于学生学习掌握光学课程的核心内容、方法,为学习后续课程和开展研究工作打下坚实的基础。

为了更有效地激发学生学习的兴趣,培养学生的创新意识,结合各章的内容,适当介绍了历史上科学家是怎样发现问题,并分析提炼形成科学假说,进一步创造出新理论的,简述了这些新的理论产生的高新技术成果,推动了社会的进步发展,同时还存在局限性。这些不仅使学生明确学习光学价值,提高学习兴趣,而且更有利于培养学生科学的辩证唯物主义的的人生观、价值观和创新能力。

(4)为一些基础较为薄弱的学生特设了基本光学现象的分析,为有余力的学生特设

了现代光学知识介绍,并适当增加了一些考研相关内容,以满足各层次学生个性化学习的需求.

精品课程的建设和与之配套的立体化教材建设是一项繁重的工作,是一项集体汗水浇灌的事业.特别是“光学”精品课程的建设与教材编写凝聚了全国 17 所高校“光学”任课教师几代人的心血与智慧,同时得到了科学出版社的大力支持.这套新教材是借助科学出版社“十二五”规划教材建设之机,在原教材基础上编写而成的,主要是:①李国华主编《光学》,山东教育出版社,1991 年 6 月;②刘坤英、范汝盐主编《光学》,中国科学技术出版社,1994 年 10 月;③刘杰、洪正平、李健主编《光学教程》,山东大学出版社,2000 年 9 月.这几套书在山东省十几所高等师范院校连续使用多年,并在全国图书公司及新华书店公开发行,至今部分高校还在继续使用.因此,本书是继往开来、与时俱进、改革创新立体化新体系教材.

在编写过程中,作者还借鉴了北京大学、清华大学、南开大学、中国科学技术大学、复旦大学、武汉大学、四川大学、山东大学、北京师范大学、华东师范大学等高校的有关教材和教学经验,甚至引用了某些内容,在此深表谢意!

山东省教育厅、聊城大学、泰山学院的领导给我们设立了“光学”精品课程的建设与教材编写专项资金,给予我们极大的鼓励,使我们的工作得以顺利进行.同时还有全国高等师范光学教学研究理事会(原中国物理学会师专分会光学教学研究理事会)的极大支持与关照,作为理事会的一项工作安排,使这套教材的编写能在全 17 所高校共同展开.在此,向他们表示衷心感谢!

本书承山东大学刘杰教授、济南大学苏永道教授、曲阜师范大学张树东教授主审,还经聊城大学胡海泉教授、孙长勇教授、李丽华高级实验师,宁波大学徐丙振教授,山东理工大学袁玉珍教授,烟台大学李作宏教授,鲁东大学王德法教授,潍坊学院逯怀新教授,九江学院谢卫军教授,黑河学院邱敏教授,菏泽学院孟庆苗教授,运城学院吉选芒教授,枣庄学院韩学政教授等审阅与指导,他们多次同作者讨论商榷,提出了很多宝贵意见,并指出了应作改进的具体内容,使作者受益匪浅,使本书增色很多,在此一并深致谢意!

全书由王文军、张山彪、杨兆华统稿定稿,牟娟老师修订了部分插图.由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请教坛同行专家不吝赐教.

作 者
2011 年 5 月

目 录

前言

绪论	1
0.1 光学研究的内容、方法和特点	1
0.2 光学学科的理论体系框架	2
0.3 光的本性——光是什么	3
第1章 几何光学的基本原理	6
1.1 几何光学的基本定律	6
1.2 费马原理	10
1.3 同心光束 物与像	14
1.4 光在平面上的反射和折射	17
1.5 光在单球面上的折射和反射	21
1.6 全反射 光纤与棱镜	30
1.7 薄透镜	35
1.8 共轴球面系统的基点和基面	43
* 1.9 共轴球面系统近轴成像的矩阵方法	50
* 1.10 变折射率光学现象	58
本章小结	60
思考题	64
习题	65
第2章 光度学与光阑	68
2.1 光度学的基本概念	68
2.2 光阑	73
2.3 像差简介	76
本章小结	80
思考题	82
习题	82
第3章 几何光学仪器原理	84
3.1 人眼的光学系统	84
3.2 助视光学仪器的放大本领	89
3.3 投影光学仪器原理	98
* 3.4 几何光学仪器的聚光本领	101

本章小结	104
思考题	105
习题	106
第 4 章 波动光学的电磁理论基础	109
4.1 光波的电磁性质	109
4.2 光波场的数学描述	113
4.3 菲涅耳公式	118
4.4 反射光在反射点产生的相位跃变 半波损失	121
* 4.5 光能流、光强的反射比和透射比	127
本章小结	130
思考题	131
习题	132
第 5 章 光的干涉	134
5.1 光源 光波的叠加原理	134
5.2 相干叠加与非相干叠加、相干条件	135
5.3 分波阵面干涉 杨氏双缝实验	137
5.4 双棱镜、双面镜、劳埃德镜干涉实验	141
5.5 光源宽度对干涉条纹可见度的影响 空间相干性	144
5.6 光源的非单色性对干涉条纹可见度的影响 时间相干性	148
5.7 分振幅薄膜干涉(一):等倾干涉	150
5.8 分振幅薄膜干涉(二):等厚干涉	155
5.9 薄膜干涉的应用	157
5.10 迈克耳孙干涉仪及应用	160
5.11 法布里-珀罗干涉仪及应用	163
* 5.12 其他干涉仪及应用	167
本章小结	171
思考题	174
习题	175
第 6 章 光的衍射	180
6.1 光的衍射现象	180
6.2 惠更斯-菲涅耳原理	182
6.3 菲涅耳半波带法和振幅矢量图解法	187
6.4 菲涅耳衍射	190
6.5 夫琅禾费圆孔衍射和圆环衍射	199
6.6 助视光学仪器的分辨本领	204
6.7 夫琅禾费单缝衍射和矩孔衍射	211

6.8	光栅衍射	220
6.9	光谱仪器分类及其基本性能	232
6.10	X 射线晶体衍射——三维立体光栅	241
* 6.11	衍射光场的分解与傅里叶变换	245
* 6.12	阿贝成像与空间滤波	247
* 6.13	全息照相	253
	本章小结	258
	思考题	261
	习题	262
第 7 章	光的偏振	265
7.1	光波的横波性与五种偏振态	265
7.2	偏振片 起偏和检偏 马吕斯定律	270
7.3	反射和折射产生的偏振光 布儒斯特定律	273
7.4	光在晶体中的双折射	275
7.5	惠更斯对双折射现象的理论解释	278
7.6	偏光棱镜	283
7.7	波晶片 圆偏振光和椭圆偏振光的获得	287
7.8	偏振光的检验	291
7.9	偏振光的干涉及应用	294
7.10	旋光现象和磁致旋光 法拉第效应	299
* 7.11	人为双折射	301
* 7.12	液晶	305
* 7.13	琼斯矢量和琼斯矩阵	307
	本章小结	311
	思考题	313
	习题	314
第 8 章	光的吸收、色散和散射	317
8.1	光的吸收	317
8.2	光的散射	322
8.3	光的色散	326
* 8.4	光的相速度与群速度	331
* 8.5	光的吸收与散射在环境监测中的应用	335
	本章小结	339
	思考题	340
	习题	341

第 9 章 光的量子性	342
9.1 热辐射 基尔霍夫辐射定律.....	342
9.2 黑体及黑体辐射实验定律.....	344
9.3 普朗克公式 能量子.....	346
9.4 光测高温法.....	348
9.5 光电效应.....	349
9.6 爱因斯坦方程 光子.....	353
9.7 康普顿效应.....	355
9.8 光的波粒二象性.....	360
本章小结	362
思考题	363
习题	363
第 10 章 激光与非线性光学基础	365
10.1 激光形成机理	365
10.2 激光器的基本结构和工作原理	369
10.3 激光的特性及应用	377
*10.4 非线性光学简介	382
本章小结	386
思考题	387
习题	387
习题参考答案	388
参考文献	395
附表	396

绪 论

0.1 光学研究的内容、方法和特点

为什么要学习研究光学？主要包括哪些内容？如何学好光学？这是学习光学时必须明确的首要问题。

作为一门学问，光学是研究光的本性、发生、传播和接收，以及光与物质相互作用及其应用的学科。它是物理学中最古老的、应用性极强的基础学科之一，随着激光的诞生与推广，它又成为当今科学领域中非常活跃的前沿阵地，对现代物理学乃至整个科学技术的发展起了重要的作用。为了让世界变得更美好，就要充分利用和发挥光的强大的生命力与不可估量的前景。这就是我们学习光学的目的和意义。

从研究方法上说，光学的研究与创新，完全符合科学的认知规律，即在观察和实验的基础上，对光学现象进行分析、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。

从思想方法上看，光学的研究存在着很多的物理精髓，值得学习与借鉴。例如，几何成像的共轭近似法、等效基点基面法、费马原理的概述；波动光学的点、线、面光源模型，相干叠加与非相干叠加的处理，衍射的标量理论，偏振光的获得等；用来表示光的量子性的普朗克公式和爱因斯坦光电效应方程，更是美妙绝伦。

从学习方法上讲，首先掌握光学的基本理论、基本概念和基本方法。基本理论包括光学的基本理论体系、基本定律、基本内容等；基本概念包括定义、名词解释、基本知识等；基本方法包括基本实验方法、基本计算方法、基本研究方法等。其次要注重阅读、听讲、分析、理解、记忆、实验、观察、解题、总结、上网查询、善于交流、发现问题、解决问题、创新思维等各方面能力的训练与提高。最后，注重培养学生学习的兴趣、学习的主动性与计划性，提高认识，戒骄戒躁，避免浮躁，减少盲目与忙乱，既能深入也能浅出，这样就有利于学习的进步、知识的掌握和创新思维的培养。

光学学科和光学课程有如下一些特点：

(1) 光学是物理学的重要分支学科，对光的本性的认识和应用是物理学中持续时间最长、影响最深远、至今还没有彻底明白的一个基本问题，所以现在和将来仍是我们研究光学的一条主线。

(2) 光学已成为现代高科技的重要基础。按照科学发展观建立和谐社会的要求，发展环保与低碳经济，那么光将是我们取之不尽、用之无穷的自然资源，所以说光学又是应用性极强的前沿学科。

(3) 光学的发展趋势——波动说和量子说相结合而发展起来的光子学。几何光学催生了放大镜、望远镜和显微镜；光速不变原理是相对论的一个基本出发点；黑体辐射、光电效应等吹散了天空中的“乌云”，为量子学的建立奠定了基础；激光技术的应用，开拓了现代物理学的新领域。那么，光子学作为一门新兴学科，将催促光子计算机，打开21世纪的一片新天地。近年来的诺贝尔物理奖都与此有关就是极好的例证。

(4) 本科生光学课程的理论基础不在课程本身而在课程之外，如研究几何成像的理论基础是数学，研究波动光学的基础是数学、力学、电磁学、原子物理学和热学。另外光学课程中还蕴藏着理论力学、统计力学、电动力学、量子力学的相关内容。

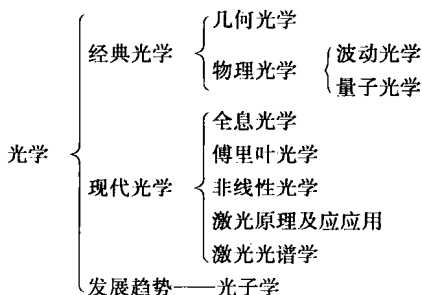
(5) 本科生光学课程内容丰富而复杂，大致分为几何光学、波动光学、量子光学的基本知识三大部分。在表面上这三部分知识相互没有关联，容易使学生感到多而杂，不系统。唯一的内在主线就是：光是什么？它是怎么产生？怎么传播？有哪些性质特点？有哪些作用和用途？所以，力求以光的本性为主线，引导学生学习光学，达到事半功倍的效果，是本书特色的体现。

(6) 上述内容里有许多时间空间图像和应用技术，如像差、时间相干、空间相干、光的散射、全息照相等，必须进行实验才能较好地理解和掌握。所以光学是一门以实验为基础的课程，学习光学，必须重视实验，做好光学实验。

总之，光学课程是一门基础课，又兼有专业课和应用技术课的性质特点，还是中学物理中最薄弱的环节。在教与学的过程中，在精品课程的建设 and 示范中心实验室的建设过程中，必须注意到这些特点，采取相应的措施，营造适应这些特点的教学环境和育人条件，确保教学的质量。

0.2 光学学科的理论体系框架

为使初学者尽快了解当前光学学科学习研究的主要内容，下面列出了光学学科的理论体系框架。



普通物理中的光学课程，主要学习经典光学的内容，即几何光学、波动光学和量子光学的有关内容，同时简要学习激光技术和非线性光学的知识。

几何光学:研究方法是撇开光的波动性,以光的直进、反射、折射等实验定律为基础,借助光线的图示,运用几何学方法,采用新笛卡儿符号法则,研究光在透明介质中的传播及光学系统成像的规律.

波动光学:研究方法是以光的本性是波长较短电磁波为基础,研究光的干涉、衍射和偏振等性质.

量子光学:原本不属于传统经典光学的内容,但是由于它把光看成是光子流为基本观点,侧重研究光的粒子性,所以习惯上仍然归属于经典光学之内.通常在分子、原子的尺度上研究光和物质的相互作用.

学好光学,既能为进一步学习原子物理、相对论、量子力学等课程准备必要的条件,又有助于进一步探讨微观和宏观世界的联系与规律,并把这些规律用于指导科学实践.

0.3 光的本性——光是什么

光是什么?光能使我们冲破黑暗看见令人振奋的蓝天、白云、彩霞,看见多彩多姿的百花齐放;尤其是宇宙中万事万物赖以生存繁衍的三个基本条件(光、水、空气).因而,光是一种重要的自然资源,没有光,就没有我们今天的五彩缤纷的世界.所以,自古以来光就让人着迷:它何以有如此大的能量,能给整个地球和宇宙带来生机与活力?为此人们经历了上千年的艰辛探索,甚至流血牺牲而又前赴后继.中国远古时代就有后羿射日、嫦娥奔月的传说.1600年2月17日,在罗马的百花广场上,意大利科学家布鲁诺(Giordano Bruno, 1548~1600)因研究太阳光,坚持哥白尼(Nicolaus Copernicus, 1473~1543,波兰天文学家)的日心说被教会活活烧死.现在的激光技术、全息技术、光纤通信、发展环保与低碳经济等瞬息万变、日新月异的高科技应用光学无不令人感叹.它激起了无数人的好奇心,这不能不说光的魅力是多么迷人啊!

大量的实验早已证实光沿直线传播的性质.但是,光还能沿弯线传播,如当光线进入弯曲的光学透明管中,就能被这个光学透明管引导,沿着它的弯曲线传播,其原理就是光的全反射,它是我们进行光纤通信的理论依据.古希腊科学家海伦·亚历山大(Heron Alexandria)用一个很简单的实验证实了这个观点.他用一个下部有小孔的水壶装满水,水从小孔中喷出而形成一道弯曲的水流,阳光按一定角度从壶的上口射入时,就会穿过这个小孔沿着弯曲的水流进行传播.现在,光纤通信的发展远远超乎人们的想象,自从1966年香港中文大学高锟博士提出光纤通信的概念以来,玻璃光纤已被选为高速、高可靠性、长途陆地及海上通信的传输媒介,它以其独特的优点掀起通信领域的一次大变革.因此高锟被誉为“光纤之父”,并获得2009年的诺贝尔物理学奖.

对于光的本性描述最早的是公元前400多年的我国先秦时代的《墨经》:光,即火.这是从火的自然属性出发而对光的一种表面认识.大约100年后古希腊的欧几里得(Euclid)所著《光学》中描述:光,即触须射线.他认为:人的眼睛能够向物体发出视线,被视线触须到的物体才能被看见.公元1世纪,埃及人阿尔哈曾(Alhazen, 965~1038)发现了光是人体以外发生的现象,来自于发光物体,并且是以球面波的形式从光源发出的.真正对光本

性的研究则始于17世纪. 格里马尔迪(F. M. Grimaldi)首先发现并提出了光的衍射现象. 接着胡克(R. Hooke)与玻意耳(R. Boyle)各自独立发现了薄膜产生的彩色干涉条纹, 也观察到衍射现象. 最为杰出的代表当数牛顿(I. Newton)和惠更斯(C. Huygens), 并由此引发了以牛顿为代表的微粒说和以惠更斯为代表的波动说的争论.

这场争论先是笛卡儿(R. Descartes, 1596~1650)设计出了光的微粒模型, 他把光比作小球来解释光的反射与折射. 牛顿接着发展了笛卡儿的模型, 提出了光是微粒流的理论. 但是, 用微粒说研究折射定律时, 得出了水中光速大于空气中的光速. 这个错误的结论在当时还无法用实验证实. 当然, 牛顿同时还做了一些光具有波动性的有益实验, 如棱镜色散实验、牛顿环干涉实验等.

与此同时, 惠更斯等则主张光的波动说, 提出了波动论的假说——惠更斯原理, 成功地推导出反射定律和折射定律, 得出了水中的光速小于空气中光速的正确结论, 并完美解释了晶体中双折射现象. 然而惠更斯的波动说很不完善, 他错误地把光看作像声波一样的纵波, 在具有一定弹性的介质“以太”中传播. 由于牛顿在物理方面的伟大成就的影响, 在17、18世纪微粒说占据主导地位, 对光的本性认识几乎再没有进展.

但是人们对光的本性的探索并未停止. 1801年托马斯·杨(Thomas Young)用双孔干涉实验成功地测出了光的波长, 并用波动理论做了很好的解释. 1808年马吕斯(E. L. Malus)发现了光在两种介质界面上反射时的偏振现象, 随后菲涅耳(A. J. Fresnel)和阿拉果(D. Arago)对光的偏振现象及其偏振光的干涉进行了研究, 同时托马斯·杨在1817年提出了光波是横波假设. 这些都很好地解释了光的干涉、衍射和偏振. 菲涅耳进一步完善了这一观点, 并导出了菲涅耳公式, 形成了惠更斯-菲涅耳原理. 1850年傅科(J. L. Foucault)测得光在水里的传播速度比在空气中小, 证明了波动说所得出的结论的正确性. 遗憾的是他们仍把光看成是“以太”中的弹性波, 至于“以太”是什么物质, 谁也说不清楚, 问题也就暴露出来了, 不仅在实验上无法得到证实, 而且理论上也显得荒唐, 既没有指出光学现象与其他物理现象的联系, 也没能把表征介质特性的光学常数和介质的其他参数联系起来, 无法自圆其说了.

1845年法拉第(M. Faraday)发现了光的振动面在强磁场中的旋转, 1856年韦伯(W. E. Weber)和柯劳斯(R. Kohlrausch)通过在莱比锡做的电学实验发现了电荷的电磁单位与静电单位的比值等于光在真空中的传播速度, 从而揭示了光学现象和电磁现象的内在联系. 1862年麦克斯韦(J. C. Maxwell)在总结法拉第、韦伯和安培(A. M. Ampere)等的实验结果时, 得出了麦克斯韦方程组, 预言了电磁波的存在. 1865年他又推算出电磁波在真空中的传播速度与光速相同, 因此他确信的指出: 光是一种电磁波. 1888年赫兹(H. R. Hertz)通过一系列实验证实了麦克斯韦理论是正确的, 从此诞生了光的电磁理论.

与此同时, 迈克耳孙(A. A. Michelson)和莫雷(E. W. Morley)在1887年制造出一种精密干涉仪——迈克耳孙干涉仪, 试图探测到地球相对于“以太”的绝对运动, 结果没有观察到任何效应, 从而否定了光波载体的“以太”假说. 1905年爱因斯坦(A. Einstein)发表了著名的狭义相对论, 认为光波是一种特殊的电磁波, 在真空中始终以恒定的速度

传播,不需要任何介质,也与观察者的运动状态无关.彻底推翻了以“静止以太”为背景的绝对时空观.为认识光的本性打开了新的大门,开辟了新的道路.

所以,后来人们普遍知道光是电磁波,它服从电磁波的所有传播和相互作用的物理定律.电磁波遍布在很宽的频率(或波长)谱上.然而,人眼不能看到这个频谱的全部.在真空中,可见光的波长范围在 $390\sim 760\text{nm}$,对应颜色从深红到暗蓝紫色.例如,钠灯的黄光是 589nm ,它所在的这部分频谱正好是我们眼睛的感受器官(视网膜圆锥细胞和杆状体)的响应范围.圆锥细胞使我们能感受颜色,而杆状体使我们能觉察非常小的光亮度,这就是我们能在黑暗中看到遥远星光的缘故.我们眼睛的感觉器官对波长大于 760nm (红外或 IR)、小于 390nm (紫外或 UV)的光不能响应,不过,某些动物眼睛的感受器官能够响应.

19 世纪末至 20 世纪初,受狭义相对论的启发,光学已深入到研究光的发射、光与物质相互作用的微观机理上.对人们发现的光的吸收、散射、色散等现象,光的电磁理论却无法解释清了.当时物理学界的权威开尔文(Lord Kelvin)把这些现象和困难比作笼罩在物理学晴朗天空中的几朵“乌云”.1900 年普朗克(M. Planck)为解释黑体辐射能量按波长的分布公式(瑞利-金斯公式)的矛盾,提出了能量子的假说,认为各种频率的电磁波(包括光),只能像粒子一样以一定最小份额的能量(称为能量子 $\epsilon = h\nu$)发生,这其实是一个“光的发射”问题.1905 年爱因斯坦根据光电效应实验现象,提出了光量子的假说,还说明了光的量子性贯穿于光与物质相互作用的全过程中,这是一个“光的吸收”问题,从而进一步发展了普朗克的量子论.1924 年德布罗意(L. V. De Broglie)提出了物质波($\lambda = h/p$)的假说,认为每一物质的粒子都与一定的波相联系,光是一种特殊物质形态,具有波粒二象性.1927 年上述这些假说被康普顿(A. H. Compton)散射实验、戴维孙(C. J. Davisson)和革末(L. H. Germer)的电子衍射实验所证实.

普朗克的量子论和爱因斯坦的光子说,驱散了物理学上空的“乌云”.德布罗意物质波正确地回答了光的本性问题,这些都使人们的认识不断提高和加深.“近代科学实验证明,光是个十分复杂的客体.对于它的本性问题,只能用它所表现的性质和规律来回答:光的某些方面的行为像经典的‘波动’,另一些方面的行为却像经典的‘粒子’.这就是所谓的‘光的波粒二象性’.任何经典的概念都不能完全概括光的本性.”^①

这里说的光子就是 1905 年爱因斯坦光量子的简称,它是光的最小度量单位($E = mc^2$),光场是由无数个光子组成的物质场.1940 年产生的量子电动力学最新认为,光子是电磁波能量和动量的量子化,电磁波振幅的平方表示出光子出现的频率,电磁波是光子的几率波.因此,用光子可把光的波粒二象性很好地统一起来.

20 世纪 60 年代激光的诞生与应用,加快了光子学的研究,当今已发展成为一门研究光子的产生、放大、传输、控制和探测,及其应用的新学科,成为开发新能源、新材料和通信、信息技术的重要应用学科,形成了 21 世纪当代光学的新领域——光子学.可见为了真正弄清光的本性,人们还在继续努力,深入探讨.

① 赵凯华. 2004. 新概念物理学教程——光学. 北京:高等教育出版社.

第 1 章 几何光学的基本原理

光是电磁波,也是光子流,是具有波粒二象性的一种特殊物质,但是人们最早发现的却是光的直线传播、独立传播、光的反射与折射等现象,这应该是光本性的一种表现,可以近似认为是光波长 $\lambda \rightarrow 0$ 的情况.若把光源或物体看成是由许多几何点组成,并由这种点发出的光抽象成具有方向的几何线——“光线”,那么,借助于光线概念,运用几何方法来研究光的传播和成像问题,就形成了光学的重要分支——几何光学.

几何光学只是对真实情况的近似处理.尽管如此,按这种方法解决有关光学系统的成像、设计和计算等光学技术问题,在大多数场合下都与实际情况相符.所以,几何光学有很大的实用意义.

几何光学是光学中发展最早的一部分,具体研究的内容是以费马原理为基础,采用新笛卡儿符号法则,研究光在透明介质中的传播及光通过光学系统的成像规律,导出各种光学系统在近轴条件下物像公式、放大率及成像作图方法.因此,本章首先找出光线的传播规律,进而讨论复合共轴光学系统的基点、基面及近轴光线成像问题.

1.1 几何光学的基本定律

1.1.1 光源和光线

1. 光源

人的眼睛之所以能看到周围的物体,是因为有光从物体发出(或光被物体表面反射)进入到眼内,引起眼睛视觉的结果.从物理学的观点看,任何能自身发光的物体都可以称为光源,如太阳、烛焰、钨丝白炽灯、日光灯、高压水银荧光灯、碘钨灯等.

光源不仅用来照明,在科学研究中,人们常使用多种类型的特殊光源来满足各种工作需要,如各种电弧和放电管.1960 年问世的激光器,则是一种与过去所有的光源性质不同的新型光源,它使人们终于有能力驾驭尺度极小、数量极大、运动极混乱的分子和原子的发光过程,从而获得产生放大相干的红外线、可见光线和紫外线(以至 X 射线和 γ 射线)的能力.激光科学技术的兴起使人类对光的认识和利用达到了一个崭新的水平.

在几何光学中,把凡是能发出光线的物体(不论是它本身发光或反射光线)都称为光源.如果某光源可看成几何学上的点,它只占有空间位置而无体积和线度,则称其为点光源.点光源是一个理想化的模型,与力学中的质点一样,自然界中并不存在真正的点光源.它只是为了讨论问题方便而引入的一个抽象概念,但只要一个光源的线度可以忽略不计,它就可以看成点光源.例如,体积超过太阳系的恒星,由于它到地球的距离比

它自身的线度大得多,故地球上的观察者就可把恒星看成是点光源.如果在研究的光学问题中,光源可视为在无限远处,则发出的光线可认为是平行光入射光学系统.

2. 光线和光束

光源发光是向周围空间(或某个范围)辐射光能.为了形象描述光源发出的光,常用带箭头的几何线段来表示光的传播方向,这条假想的带箭头的无粗细的几何线段称为光线.

点光源向周围空间均匀辐射光能,这时的光线是以点光源为中心,射向周围空间的无数条直线.具有一定关系的光线的集合称为光束.若在光束传播路径放入一个孔径可变的圆孔光阑,就可从光束中分离出狭窄的光束.但是由于衍射的存在,当进一步缩小孔径时光束不仅不会缩小,反而会扩大.光线和点光源一样,也是一个抽象的概念,在实际中是不存在的.

引入点光源和光线的概念以后,可以用几何方法来讨论系统的成像规律,这就可使问题大为简化.而且对一般光学仪器而言,它的通光孔径通常都比光波长大多,衍射效应并不明显,用几何光学所得的结果与实际情况很好地符合,所以几何光学有着重要的实际意义,它是光学仪器设计理论的基础.当然,对于像的一些精细问题(如光学仪器分辨本领)的研究,需用波动理论才能解决.

3. 波面

实际上光是一种电磁波,因此我们需要知道光线和波面间的关系.通常我们认为光振动可用电磁波中电场强度的变化来表示.从能量的观点来看,光从光源向外传播的是光源振动能量,习惯上常说光源的振动在周围空间传播.光振动的方向垂直于光的传播方向.在光的传播过程中,具有相同的振动相位的点所组成的曲面或平面称为波面.在各向同性介质中,光沿着波面法线方向传播,所以可以认为光波波面的法线就是几何光学中的光线.与波面对应的法线束就是光束.球面波对应于会聚或发散光束,平面波对应于平行光束,如图 1.1.1 所示.

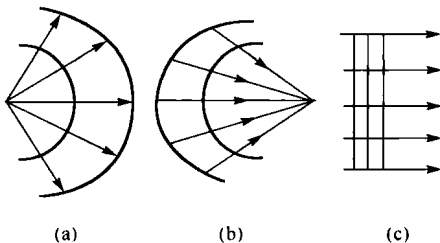


图 1.1.1 发散球面波、会聚球面波与平面波

1.1.2 几何光学基本定律

人们在长期生活实践和科学实验中,运用光线的概念和几何学方法,总结出了光在均匀介质中及其界面上的传播规律,统称为几何光学基本定律,它是几何光学的理论基础.

1. 光的直线传播定律

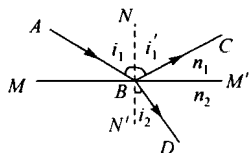
光在均匀透明介质中沿直线传播,称为光的直线传播定律. 针孔成像、不透明物体在点光源照射下影的产生等都是直线传播定律的例证. 早在我国战国时期的墨家著作《墨经》中,就根据光的直进性思想讨论了影的产生,并解释了针孔成像实验中倒像的成因. 根据光的直线传播定律,容易解释日食、月食等现象. 但是,在非均匀介质中,光线的传播将发生弯曲. 例如,来自太阳的光线穿过地球大气层时,由于大气层密度不均匀,光线发生了弯曲,所以当太阳实际落到地平线之下后,我们仍然能看见它.

2. 光的独立传播定律

从不同光源发出的光束以不同方向同时通过空间某点时,互不影响,各自独立传播,即每一束光的传播方向及其性质(频率、波长、偏振态等)都不因交叉而发生改变. 正因为光的传播过程中具有这种特性,所以尽管物体上各点发出的光彼此交错,但并不妨碍人们看清物体.

3. 光的反射和折射定律

如图 1.1.2 所示. 一束入射光线 AB 照射到两种介质分界面 MM' 上,在入射点 B 处分为两部分,反射光线 BC 反射回原来介质,另一部分折射光线 BD 透过界面进入到另一种介质. 反射光线和折射光线的传播方向分别由反射定律和折射定律来决定.



1) 反射定律

光的反射遵循的规律称为反射定律,光的反射定律确定了反射光线的位置.

(1) 反射光线 BC 在入射光线 AB 和法线 NN' 所决定的平面内,反射光线 BC 和入射光线 AB 分别在法线 NN' 的两侧;

(2) 反射角等于入射角,即 $i_1' = i_1$.

平行光线经光滑界面反射后沿某一方向平行射出,只能在某一方向接收到反射光线. 若反射界面凹凸不平时,则不会产生单向反射而是形成漫反射. 例如,阳光照射到镜子上,迎着反射光的方向可以看到刺眼的光. 如果阳光照射到白纸上,无论在哪个方向,都不会感到刺眼. 电影院的银幕、投影幕布都是生活中最常见的漫反射例子.

2) 光的折射

光照射到两种介质界面时,不仅会发生反射,同时还会发生折射. 光从一种介质进入另一种介质,这种现象称为光的折射,折射光线的方向遵守折射定律:

(1) 折射光线 BD 在入射光线 AB 和法线 NN' 所决定的平面内,并且折射光线 BD 和入射光线 AB 分别在法线 NN' 两侧;

(2) 对于单色光而言,入射角 i_1 的正弦与折射角 i_2 的正弦之比对给定的两种介质来说是一个常数,即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \text{常数}$$