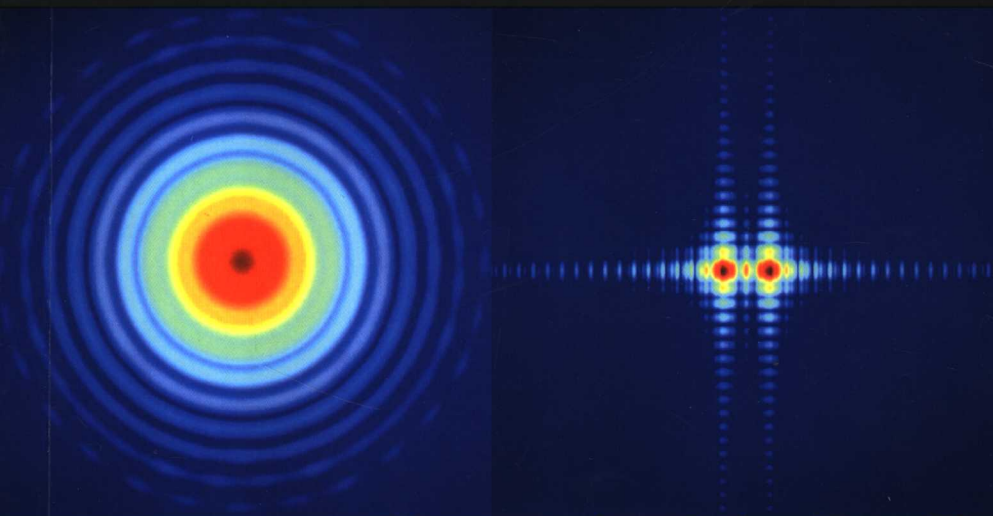




普通高等教育“十五”国家级规划教材

光学

■ 赵建林 编著



OPTICS



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

043
36

普通高等教育“十五”国家级规划教材

光 学

赵建林 编著

高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,是根据作者多年来讲授应用物理专业光学课程及其他相关课程的教案和教学体验编写而成的。本书从现代光学视角对基础光学内容和体系的编排作了新的尝试,一改传统的按几何光学、波动光学、量子光学顺序或经典光学与现代光学完全分割的内容编排方式,着重以建立光的完整图像为目标,以光波、光线和光子的传播特性为主线,系统地介绍了光学的基本概念、理论、规律、分析方法以及重要应用。书中各章末还附有精选的习题和讨论思考题。

本书基本概念准确,物理图像清晰,叙述思路独特,逻辑体系严谨,数学运算简洁,取材具有时代感。可作为高等学校应用物理学、光信息科学与技术、光电信息工程以及材料物理等专业的的基础光学课程教材,也可以作为相关工程类专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光学/赵建林编著. —北京:高等教育出版社,

2006.5

ISBN 7-04-019268-3

I. 光... II. 赵... III. 光学-高等学校-教材

IV. 043

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 026300 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 河北新华印刷一厂

开 本 787×960 1/16
印 张 24
字 数 450 000
插 页 1

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006 年 5 月第 1 版
印 次 2006 年 5 月第 1 次印刷
定 价 25.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19268-00

序

20 世纪初期以来,光学作为物理学的一个重要分支,对近代物理学乃至整个自然科学和技术领域的发展都发挥了重大的推动作用。从狭义相对论和量子论的诞生、X 射线的发现到激光的产生和全息术的发明,无不渗透着光学研究的巨大成就。20 世纪 60 年代以来,随着激光技术及其应用的迅速发展,以近代光学理论与技术为基础的光子技术,包括光通信、光信息处理与存储、光计算、光显示、光电探测与精密测量、军事光电对抗技术等,已成为现代高新技术的代名词之一。特别是自 20 世纪 80 年代末期以来,光学学科如同计算机学科的发展一样迅速,大量的新现象、新理论及新技术不断被发现或提出。激光器及形形色色的光学仪器已成为包括物理、信息、仪器仪表、材料、生物医学、航空航天等各类专业领域的实验室中越来越不可缺少的关键设备之一。于是从物理学角度来看,光学是一门基础课程;从应用科学角度来看,光学又是一门技术基础课程。不仅物理学各专业需要,而且随着学科间的不断交叉和渗透,许多相关的工程技术类专业也需要开设这门基础光学课程。

本书是根据作者多年来讲授应用物理专业光学课程及其他相关课程的教案和教学体验编写而成,既包含了基础光学的传统内容,也包含了许多与科技应用密切相关的现代光学前沿内容,同时还包含了作者的一些研究心得。在内容的安排上,本书汲取了国内外近二十年来出版的优秀基础光学教材的优点,结合作者多年的教学尝试和研究,一改通常按几何光学、波动光学、量子光学分叙或经典光学与现代光学完全分割的内容编排方式,采取了一种新的结构,更新了对基本概念的阐述思路,从而增强了基础光学内容的系统性、紧凑性和时代感。除开篇的绪论外,全书共分为八章,每章末附有讨论思考题和习题。全书以光波、光线和光子的传播特性为主线,并将现代光学的概念贯穿于始终。这主要是考虑到目前的学生从很早就可能已经耳濡目染了许多现代光学技术的应用事例,如光盘、光通信、光显示、光传感、激光制导、激光武器等,在适当的教学安排和导引下,完全可以从一个较新的视点来认识和掌握基础光学的内容。

本书可作为综合大学和理工院校应用物理学、光信息科学与技术、材料物理等专业的的基础光学课程教材,也可以作为有关工程类专业如电子科学与技术(光电子技术)、光电信息工程、测控技术与仪器等的类似课程的教学参考书。

本书适用于 64 ~ 72 学时的课程讲授。考虑到不同学校不同专业的课程学

时和具体需要不同,建议可将书中的小字体内容或其他某些内容,结合讨论思考题,采用课外讨论或自学的方式处理。

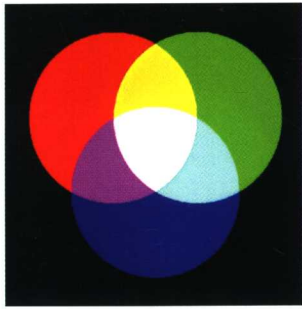
在本书的立项和编写过程中,高等教育出版社曾给予了热情的鼓励,西北工业大学教务处对配套电子教材的编写提供了重要的经费支持,西北工业大学教材建设委员会的诸位专家们曾多次对本书及配套电子教材的编写提出了许多宝贵的建设性意见,西北工业大学徐绪笃教授对本书作了认真仔细的审阅并提出了许多中肯而有意义的修改建议,高等教育出版社的胡凯飞、庞永江、王文颖等同志为本书的编辑出版付出了大量心血。没有这些热情的鼓励、慷慨的支持、宝贵的建议和无私的奉献,本书难以现在的面目与读者见面。对此,编者只有尽全力地写好本书,才能真正表达出对这些鼓励、支持和帮助的由衷谢意。

编者的几位研究生也曾参与了一些编写工作,其中谢嘉宁、周俭波、曲伟娟、王军等协助编制了配套的虚拟光学实验软件,并制作了大量的仿真光学实验图片,陆红强、邱江磊、彭涛等协助演算了书中给出的大部分习题,并对试用教材中的部分错误作了校对,徐宏来参与制作了配套的PPT版电子教案。在此也对他们的支持和积极参与表示感谢。

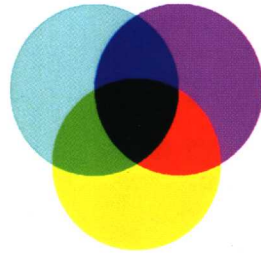
坦率地讲,本书有幸被选入国家“十五”重点规划教材和高等教育百门精品课程教材选题计划项目,完全是出于业内同行对编者的厚爱和鼓励。编者虽然尽力希望写好它,但限于自身的学识和专业水平,难免存在理解上的肤浅和编写上的疏漏,祈请读者批评和指正。

赵建林

2005年11月



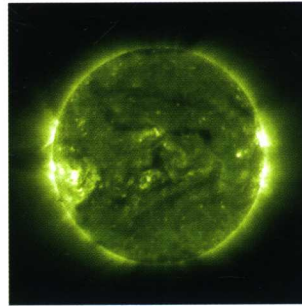
彩图 1 相加三基色原理



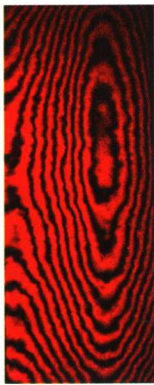
彩图 2 相减三基色原理



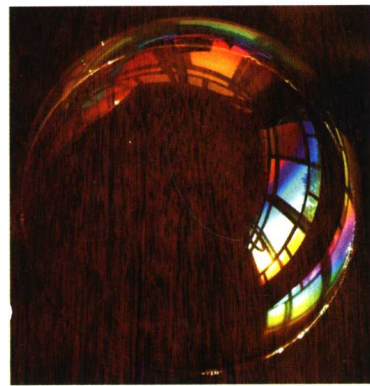
彩图 3 卫星拍摄的地球的红外图像



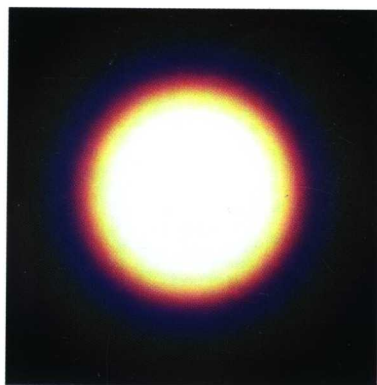
彩图 4 太阳的远紫外线图像(19.5nm)



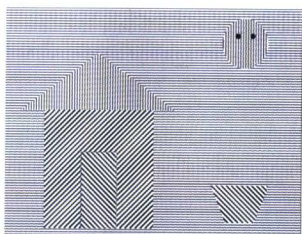
彩图 5 玻璃板前后表面反射光的干涉图样



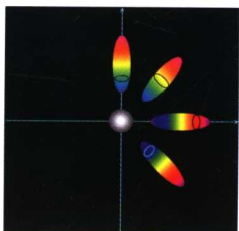
彩图 6 正在破裂的半球形水膜



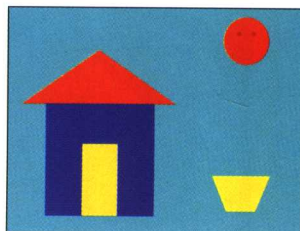
彩图 7 任意衍射屏的仿真菲涅耳衍射图样 彩图 8 白光照射下的圆孔夫琅禾费衍射图样



经不同光栅编码后的图像



白光照射下编码图像的频谱



滤波解码编码后的图像

彩图 9 黑白图像的假彩色编码与解码原理



彩图 10 像面全息图的白光再现像



彩图 11 透明胶带薄膜的偏光干涉图样
(上:暗场,下:亮场)

目 录

绪论	1
1. 光学的研究对象、地位和特点	1
2. 光的本性	1
3. 现代光学的主要标志	4
4. 光学的发展趋势——光子学	5
第 1 章 光波、光线与光子	8
§ 1.1 光的波动性质	8
1.1.1 波动的实质	8
1.1.2 波动的基本特征量	8
1.1.3 波动的描述	9
1.1.4 纵波与横波	13
1.1.5 光的波动性	14
1.1.6 光波的电磁性质	14
§ 1.2 光线与光传播的几何描述	16
1.2.1 光传播的直线性、独立性和可逆性	16
1.2.2 反射和折射定律	17
1.2.3 全反射原理	18
1.2.4 光纤的基本结构特性	21
1.2.5 棱镜及其应用	23
1.2.6 光程与费马原理	27
§ 1.3 自然光与偏振光	29
1.3.1 完全偏振光	30
1.3.2 自然光	31
1.3.3 部分偏振光	32
1.3.4 自然光在两种电介质分界面上的反射和折射 菲涅耳公式	33
1.3.5 斯托克斯倒易关系	35
1.3.6 布儒斯特定律	35
1.3.7 马吕斯定律	38
1.3.8 反射光与透射光的半波损失(相位突变)	38
1.3.9 反射光与透射光的能量分配	40
§ 1.4 光辐射与光度学	41

1.4.1	光源与光辐射	41
1.4.2	辐射度学与光度学	43
1.4.3	辐射能通量与光通量	43
1.4.4	发光强度与光亮度	46
1.4.5	光照度	48
1.4.6	色度与三基(原)色	49
1.4.7	光度学基本量的单位	51
§ 1.5	光波场的量子性	52
1.5.1	黑体辐射	52
1.5.2	光电效应	57
1.5.3	康普顿效应	60
§ 1.6	光的波粒二象性	62
1.6.1	光波与光子的对立统一	62
1.6.2	德布罗意方程	63
1.6.3	对光的本性的再认识	64
	习 题	64
	讨论思考题	67
第 2 章	光学成像的几何学原理	70
§ 2.1	几何光学成像的基本概念	70
§ 2.2	光在单个球面上的折射与成像	73
2.2.1	基本概念和符号规则	73
2.2.2	光在单个球面上的折射,同心性的破坏	74
2.2.3	轴上物点的傍轴光线成像	74
2.2.4	高斯物像公式	76
2.2.5	牛顿物像公式	76
2.2.6	光在单个球面上的反射成像	77
2.2.7	光在单个平面上的折射、反射成像	77
2.2.8	离轴物点的傍轴光线成像	78
2.2.9	成像放大率	80
2.2.10	亥姆霍兹公式与拉格朗日-亥姆霍兹定理	82
§ 2.3	共轴球面组的傍轴成像 透镜	82
2.3.1	共轴球面组的傍轴成像	82
2.3.2	透镜及其分类	83
2.3.3	厚透镜的成像特性	84
2.3.4	薄透镜的成像特性	84
2.3.5	自聚焦透镜及其成像特性	87
§ 2.4	理想光具组理论	88

2.4.1	理想光具组	88
2.4.2	理想光具组的基点和基面	89
2.4.3	焦点、主点、节点间的位置关系	91
2.4.4	理想光具组成像的几何作图法	93
2.4.5	共轴球面组的基点基面	93
§ 2.5	像差	98
2.5.1	单色像差及其消除	99
2.5.2	色像差及其消除	103
§ 2.6	光阑	104
2.6.1	孔径光阑、入射光瞳、出射光瞳	104
2.6.2	视场光阑、入射窗、出射窗	106
2.6.3	像的亮度和照度	108
§ 2.7	几何光学仪器原理	110
2.7.1	成像仪器	110
2.7.2	眼睛及助视仪器	113
2.7.3	简单放大镜	116
2.7.4	目镜	118
2.7.5	显微镜	119
2.7.6	望远镜	121
2.7.7	激光扩束器	123
2.7.8	分光仪器	123
	习题	125
	讨论思考题	129
第3章	光的干涉与相干性	132
§ 3.1	波前 傍轴条件与远场条件	132
3.1.1	波前的概念	132
3.1.2	同轴球面波的傍轴条件与远场条件	134
3.1.3	离轴球面波的傍轴条件与远场条件	135
§ 3.2	波动叠加与光的干涉	137
3.2.1	波动的独立性、叠加性及相干性	137
3.2.2	光的相干条件	140
3.2.3	双光束干涉及干涉条件	141
3.2.4	两束平面波的干涉	142
3.2.5	多光束干涉及干涉条件	144
3.2.6	获得相干光波的方法	147
§ 3.3	分波前干涉 光场的空间相干性	147
3.3.1	杨氏双孔干涉实验	147

3.3.2	光源宽度对干涉条纹图样的影响	150
3.3.3	光场的空间相干性	154
3.3.4	其他分波前干涉实验	155
§ 3.4	分振幅干涉(薄膜干涉)	158
3.4.1	光波经薄膜层的反射和透射	158
3.4.2	总光程差与总相位差	159
3.4.3	干涉条件	161
3.4.4	等倾干涉	162
3.4.5	等厚干涉	163
3.4.6	定域干涉与非定域干涉	168
3.4.7	复色光或白光照明下的薄膜干涉	169
§ 3.5	迈克耳孙干涉仪 光场的时间相干性	172
3.5.1	迈克耳孙干涉仪的结构	172
3.5.2	干涉条纹特点	173
3.5.3	光源的非单色性对干涉图样衬比度的影响	174
3.5.4	光场的时间相干性	178
3.5.5	时间相干性与空间相干性之比较	179
§ 3.6	法布里-珀罗干涉仪	179
3.6.1	干涉仪结构	179
3.6.2	干涉图样特点	180
3.6.3	法布里-珀罗干涉仪的应用	183
§ 3.7	其他干涉仪	186
3.7.1	泰曼-格林干涉仪	186
3.7.2	傅里叶变换干涉仪	186
3.7.3	马赫-曾德干涉仪	188
3.7.4	塞纳克干涉仪	188
	习 题	189
	讨论思考题	192
第 4 章	光的衍射与变换	195
§ 4.1	衍射现象及其数学描述	195
4.1.1	光的衍射现象	195
4.1.2	惠更斯原理	196
4.1.3	惠更斯-菲涅耳原理	197
4.1.4	菲涅耳-基尔霍夫衍射积分	199
4.1.5	巴俾涅原理	199
4.1.6	衍射现象的分类	200
§ 4.2	菲涅耳衍射	202

4.2.1	圆孔的非涅耳衍射	202
4.2.2	圆盘的非涅耳衍射	209
4.2.3	直边及单缝的非涅耳衍射	210
4.2.4	任意形状屏的非涅耳衍射	211
§ 4.3	夫琅禾费衍射	212
4.3.1	夫琅禾费衍射图样的观察	212
4.3.2	单缝的夫琅禾费衍射	214
4.3.3	矩形孔的夫琅禾费衍射	218
4.3.4	圆孔的夫琅禾费衍射	219
4.3.5	双缝或双孔的夫琅禾费衍射	222
§ 4.4	衍射光栅	224
4.4.1	光栅及其结构特点	224
4.4.2	朗琴光栅的夫琅禾费衍射	225
4.4.3	闪耀光栅	232
4.4.4	正弦光栅的夫琅禾费衍射	233
4.4.5	体光栅的布拉格衍射	234
4.4.6	光栅的云纹效应	235
4.4.7	塔耳博特效应	236
§ 4.5	衍射光场的分解与傅里叶变换	238
4.5.1	衍射光场的傅里叶分解	238
4.5.2	二维傅里叶变换的基本性质	239
4.5.3	夫琅禾费衍射的再讨论	241
4.5.4	菲涅耳衍射的再讨论	242
4.5.5	干涉与衍射的区别和联系	242
	习题	243
	讨论思考题	245
第 5 章	光学成像的波动学原理	247
§ 5.1	阿贝成像原理与空间滤波	247
5.1.1	阿贝成像原理	247
5.1.2	阿贝成像原理的傅里叶描述	249
5.1.3	空间滤波与光信息处理	249
5.1.4	阿贝-波特实验	249
5.1.5	空间滤波的应用	251
§ 5.2	全息成像	253
5.2.1	光学成像的平面性与空间立体性	253
5.2.2	全息照相原理	255
5.2.3	全息图的分类与制作方法	257

§ 5.3 菲涅耳波带片与全息透镜	261
5.3.1 菲涅耳波带片及其成像特性	261
5.3.2 全息透镜及其成像特性	265
5.3.3 针孔、针头反射镜及圆盘的成像特性	266
§ 5.4 光学仪器的分辨本领	267
5.4.1 衍射受限系统的成像特点	267
5.4.2 瑞利判据	269
5.4.3 成像仪器的分辨本领	270
5.4.4 眼睛及助视仪器的分辨本领	271
5.4.5 分光仪器的分辨本领	272
习题	274
讨论思考题	274
第 6 章 光的双折射与光调制	276
§ 6.1 晶体的双折射现象	276
6.1.1 晶体的结构特征	276
6.1.2 双折射现象	277
6.1.3 双折射现象的理论解释	280
§ 6.2 晶体光学器件	286
6.2.1 起偏与检偏器件	286
6.2.2 相位延迟器件——波片	290
§ 6.3 椭圆偏振光的获得与检验	293
6.3.1 正交振动的平面偏振光的合成	293
6.3.2 椭圆偏振光的获得	295
6.3.3 椭圆偏振光的检验	297
§ 6.4 偏振光的干涉	298
6.4.1 平面偏振光的干涉	298
6.4.2 平行偏振光的干涉	299
6.4.3 会聚偏振光的干涉	303
§ 6.5 场致双折射现象及其应用	305
6.5.1 应力光学效应——光弹性效应	305
6.5.2 电光效应	306
6.5.3 磁光克尔效应	307
§ 6.6 旋光效应与圆双折射	307
6.6.1 旋光现象	307
6.6.2 旋光现象的解释——菲涅耳假设	308
6.6.3 磁致旋光效应——法拉第效应	311
6.6.4 法拉第效应的应用	311

习题	313
讨论思考题	314
第 7 章 光的吸收、色散及散射	315
§ 7.1 光的吸收	315
7.1.1 吸收定律	315
7.1.2 介质吸收的特点	316
7.1.3 吸收的起因	317
7.1.4 吸收光谱及其应用	318
§ 7.2 光的色散与群速度	320
7.2.1 色散的概念	320
7.2.2 色散现象的观察	320
7.2.3 色散曲线的特征	322
7.2.4 色散现象的理论解释	323
7.2.5 群速度	324
§ 7.3 光的散射	327
7.3.1 散射的一般概念	327
7.3.2 瑞利散射	329
7.3.3 米氏散射	330
7.3.4 拉曼散射与布里渊散射	330
习题	331
讨论思考题	332
第 8 章 激光基础	333
§ 8.1 自发辐射与受激辐射	333
8.1.1 原子能级及粒子数布居	333
8.1.2 自发辐射、受激辐射和受激吸收	334
8.1.3 爱因斯坦公式	335
8.1.4 粒子数布居反转与光放大	336
8.1.5 能级寿命	336
§ 8.2 激光的产生与激光器	337
8.2.1 激光器的基本结构	337
8.2.2 激光介质中粒子数布居反转的实现	339
8.2.3 增益系数及阈值条件	340
8.2.4 辐射线宽	340
8.2.5 激光的纵模和横模	341
8.2.6 几种典型的激光器	343
习题	346
习题参考答案	347

汉英光学名词索引	352
彩色插页	

绪 论

1. 光学的研究对象、地位和特点

光是一种重要的自然现象. 统计表明, 人类从外界接受到的全部信息的70%来自眼睛. 我们之所以能够看到来自客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象, 就是因为眼睛接收到了来自客观物体发射、反射或散射的光.

光学是物理学的一个重要分支. 光学的研究对象是光, 包括光的本性以及光的发射、传播、接收和光与物质相互作用等方面的规律.

光学也是一门应用性极强的基础学科. 光学的每一项研究进展, 都曾经对物理学乃至整个科学技术的发展产生过重大的推动作用. 望远镜的发明开创了天文学和宇宙学研究的新纪元; 显微镜的发明打开了通向微观世界的大门, 也开创了生物学的新纪元; 20世纪的物理学乃至所有重大科技成就, 如相对论、量子论、激光技术、微电子技术、光通信技术、航天技术等, 无不与光学研究的进展有关.

在基础光学中, 根据所适用的研究观点不同, 一般将光学分为几何光学和物理光学两部分, 后者又分为波动光学和量子光学.

几何光学以光的直线传播性质为基础, 利用光线的概念, 以及折射和反射定律等实验规律来描述光线在各种透明介质中的传播规律, 是波动光学在某些条件下(即波长趋于零)的近似或极限.

波动光学以光的电磁波动性质为基础, 研究光的传播、干涉、衍射、偏振以及光与物质相互作用等规律. 但基础光学中的波动光学仅侧重于解释光波的表现行为, 并不详细涉及介电常数和磁导率与物质结构的关系.

量子光学以光的量子性为基础, 从更深的层次上研究光的发射以及光与物质相互作用的基本规律.

作为基础光学教材, 本书主要讨论光学的基本概念、原理及典型应用. 鉴于波动光学与几何光学的关联, 而量子光学需涉及更多的物理和数学基础, 故本书重点集中于波动光学.

2. 光的本性

光学是一门古老而又年轻的学科. 历史上人们对光本性认识的发展经历了漫长的过程. 关于光的本性的最早描述记载于公元前400多年的《墨经》一书: 光, 即火. 这是由火的自然属性出发而获得的对光的一种唯象认识. 古人按照五

行说认为,火属五行之一,五行生于元气,故光生于元气.发光谓之吐气,受光谓之含气.这非常类似于后来在欧洲诞生的光的微粒说.

人类真正对光的本性的研究始于17世纪的欧洲.这个时代在自然科学领域的杰出代表是英国物理学家、数学家和天文学家牛顿(I. Newton).牛顿不仅对力学、数学、天文学的发展做出了巨大的贡献,在光学领域也取得了重要成就,如发现棱镜色散、透镜成像规律、薄膜干涉时的牛顿环现象等,这些工作总结在他所著的《光学》一书中.牛顿认为,光是一种高速运动着的微粒流.牛顿的微粒说能够很好地解释光在均匀介质中的直线传播以及在两种介质分界面上的反射规律,但在解释折射现象时,会得出与实际情况相反的结果——光在光密介质中的传播速度应大于在光疏介质中的传播速度.并且微粒说也不能正确地解释光的干涉、衍射和偏振等现象.

几乎在与牛顿倡导微粒说的同时,荷兰物理学家惠更斯(C. Huygens)则提出了光的波动说.惠更斯认为,光是在充满整个空间的特殊介质——“以太”中传播的某种弹性波,因此服从波动的传播规律——惠更斯原理.利用惠更斯原理不仅能够正确地解释光的直线传播和反射定律,也能够正确地解释光的折射定律及双折射现象.然而,惠更斯的波动说很不完善,加之牛顿当时在力学上所取得的巨大成就的影响,使得光的微粒说在18世纪以前的相当长时期内一直占上风.

1801年,英国物理学家托马斯·杨(T. Young)演示了著名的双孔干涉实验.他让一束狭窄的光束穿过两个相距很近的相同小孔后,再投射到一张白色屏幕上,结果发现,通过两个小孔的两束光在屏幕上的重叠区域内形成了一组明暗相间的条纹.微粒说无法解释这组条纹的起因,而波动说却能给出圆满的解释——光波干涉的结果.于是,杨氏于1802年在皇家学会宣读了关于“光的波动说”的论文,从而使光的波动说重新兴起.不过,与惠更斯的波动说不同,杨氏提出的波动说中已经包含了波长的概念,并初步测出了光波波长的尺寸.基于杨氏的双孔干涉思想,法国物理学家菲涅耳(A. J. Fresnel)又提出了双平面镜和双棱镜干涉实验,进一步证实了杨氏关于双孔干涉现象解释的正确性.同时,菲涅耳于1819年完成了著名的“光的绕射实验”.他发现,当障碍物的几何线度小到可以与光的波长相比拟时,则光波在传播中可以“绕”过该障碍物,并在其后面的屏幕上形成明暗相间的条纹图样——称之为绕射花样(现称衍射图样).菲涅耳利用惠更斯的次级球面子波及干涉原理对此作了正确解释.他认为,光波的传播过程,实际上是波面上各点相继发出的一系列次级球面子波互相叠加干涉的结果.按照这一思想,他计算出了各种障碍物与小孔产生的衍射图样,并且圆满地解释了光在各向同性介质中的直线传播现象.此外,菲涅耳还对光的偏振及双折射现象进行了大量的研究,其重要贡献包括著名的菲涅耳公式、菲涅耳方程,