



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材



浙江省重点建设教材

光学工程

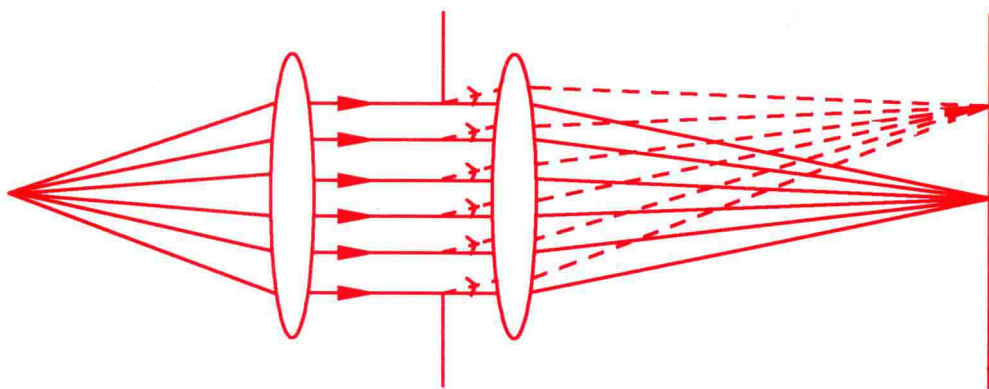
**P** rinciples of Optics, Second Edition

# 光学原理

(第2版)

沈常宇 金尚忠 编著

Shen Changyu Jin Shangzhong



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

Principles of Optics, Second Edition

# 光学原理

(第2版)

沈常宇 金尚忠 编著

Shen Changyu Jin Shangzhong



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了经典光学原理的理论体系及现代光学技术的发展与应用,是在第1版的基础上修订而成的。本书由两部分组成,上部分为几何光学及典型光学系统,包括第1~4章,系统地介绍了光学发展简史、几何光学基本原理、光学系统的光阑及像差和典型光学仪器的基本原理。与第1版相比第3章增加了光阑的计算内容,通过定量计算,不但巩固和加强了各种光阑的概念,而且充分衔接第4章中放大镜、显微镜、望远镜的计算和应用。像差方面重点修改了原来球差部分内容,增加了复合透镜消球差的具体例子、无球差齐明点及齐明透镜等。下半部分为物理光学,包括第5~10章,其主要内容包括物理光学基础、光波的干涉、光的衍射、光的偏振与晶体光学基础、傅里叶光学及全息术以及光的度量、吸收、散射和色散等。

本教材参照教育部教学指导委员会的基本教学要求编写而成,在注重基本理论阐述的同时,加强理论与工程实践的结合,并充分考虑当前光学原理教学过程中所需要掌握的重点和难点教学,每章都提出了具体的学习目标,并针对每章的重点和难点,给出了丰富的例题分析和解答。

本书可作为高等学校光电信息科学与工程、电子科学与技术、电子信息工程、测控技术与仪器等相关专业的光学及光学工程类课程教材,也可作为从事光电技术、仪器仪表技术、精密测量、检测技术等工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

光学原理/沈常宇,金尚忠编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2017

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-47015-1

I. ①光… II. ①沈… ②金… III. ①光学—高等学校—教材 IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 102021 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18

字 数:436千字

版 次:2013年6月第1版 2017年9月第2版

印 次:2017年9月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:45.00元

产品编号:070696-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一  
顾问委员会

|     |                   |     |                   |
|-----|-------------------|-----|-------------------|
| 谈振辉 | 北京交通大学（教指委高级顾问）   | 郁道银 | 天津大学（教指委高级顾问）     |
| 廖延彪 | 清华大学（特约高级顾问）      | 胡广书 | 清华大学（特约高级顾问）      |
| 华成英 | 清华大学（国家级教学名师）     | 于洪珍 | 中国矿业大学（国家级教学名师）   |
| 彭启琮 | 电子科技大学（国家级教学名师）   | 孙肖子 | 西安电子科技大学（国家级教学名师） |
| 邹逢兴 | 国防科学技术大学（国家级教学名师） | 严国萍 | 华中科技大学（国家级教学名师）   |

一  
编审委员会

|        |     |           |     |                |
|--------|-----|-----------|-----|----------------|
| 主 任    | 吕志伟 | 哈尔滨工业大学   |     |                |
| 副主任    | 刘 旭 | 浙江大学      | 王志军 | 北京大学           |
|        | 隆克平 | 北京科技大学    | 葛宝臻 | 天津大学           |
|        | 秦石乔 | 国防科学技术大学  | 何伟明 | 哈尔滨工业大学        |
|        | 刘向东 | 浙江大学      |     |                |
| 委 员    | 王志华 | 清华大学      | 宋 梅 | 北京邮电大学         |
|        | 韩 焱 | 中北大学      | 张雪英 | 太原理工大学         |
|        | 殷福亮 | 大连理工大学    | 赵晓晖 | 吉林大学           |
|        | 张朝柱 | 哈尔滨工程大学   | 刘兴钊 | 上海交通大学         |
|        | 洪 伟 | 东南大学      | 陈鹤鸣 | 南京邮电大学         |
|        | 杨明武 | 合肥工业大学    | 袁东风 | 山东大学           |
|        | 王忠勇 | 郑州大学      | 程文青 | 华中科技大学         |
|        | 曾 云 | 湖南大学      | 李思敏 | 桂林电子科技大学       |
|        | 陈前斌 | 重庆邮电大学    | 张怀武 | 电子科技大学         |
|        | 谢 泉 | 贵州大学      | 卞树檀 | 第二炮兵工程大学       |
|        | 吴 瑛 | 解放军信息工程大学 | 刘纯亮 | 西安交通大学         |
|        | 金伟其 | 北京理工大学    | 毕卫红 | 燕山大学           |
|        | 胡秀珍 | 内蒙古工业大学   | 付跃刚 | 长春理工大学         |
|        | 贾宏志 | 上海理工大学    | 顾济华 | 苏州大学           |
|        | 李振华 | 南京理工大学    | 韩正甫 | 中国科学技术大学       |
|        | 李 晖 | 福建师范大学    | 何兴道 | 南昌航空大学         |
|        | 何平安 | 武汉大学      | 张新亮 | 华中科技大学         |
|        | 郭永彩 | 重庆大学      | 曹益平 | 四川大学           |
|        | 刘缠牢 | 西安工业大学    | 李儒新 | 中科院上海光学精密机械研究所 |
|        | 赵尚弘 | 空军工程大学    | 董友梅 | 京东方科技集团        |
|        | 蒋晓瑜 | 装甲兵工程学院   | 蔡 毅 | 中国兵器科学研究院      |
|        | 仲顺安 | 北京理工大学    | 冯其波 | 北京交通大学         |
|        | 黄翊东 | 清华大学      | 张有光 | 北京航空航天大学       |
|        | 李勇朝 | 西安电子科技大学  | 江 毅 | 北京理工大学         |
|        | 章毓晋 | 清华大学      | 张伟刚 | 南开大学           |
|        | 刘铁根 | 天津大学      | 宋 峰 | 南开大学           |
|        | 王艳芬 | 中国矿业大学    | 靳 伟 | 香港理工大学         |
|        | 苑立波 | 哈尔滨工程大学   |     |                |
| 丛书责任编辑 | 盛东亮 | 清华大学出版社   |     |                |

# 序

## FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

# 第2版前言

## FOREWORD

为适应“十三五”高等学校教学改革需要,《光学原理(第2版)》针对作为“十一五”浙江省重点建设教材的《光学原理(第1版)》进行了修订,使光学原理的教学内容和课程体系更适应于光电类及相近专业的教学要求。

修订的指导思想仍然是在注重论述光学的基本原理的同时,紧密联系光学工程实践问题,并努力注重工具的应用。

本书修订后仍由上下两部分组成,上部分为几何光学及典型光学系统,下半部分为物理光学。

第3章中各节原结构为光阑的分类,孔径光阑、入瞳及出瞳,视场光阑、入射窗和出射窗,渐晕光阑,远心光路,其中各部分内容不是并立关系,内容有重复。现修改为光阑的分类、光阑的计算、远心光路三部分。在“光阑的计算”中,通过定量计算,不但巩固和加强“光阑的分类”中的概念,而且与后续内容(包括第4章放大镜、显微镜、望远镜等)衔接较好,补充了“像方远心光路”的概念。像差概念很多,我们注重掌握球差和位置色差,理解子午慧差、畸变和倍率色差,了解弧矢慧差及正弦差、像散、场曲等。3.3节结构修改为轴上点球差,轴外点球差,像散和场曲,畸变,色差,波像差。重点修改了原来球差部分内容,增加了复合透镜消球差的具体例子、无球差齐明点及齐明透镜等。正弦差作为慧差的一个特例,减少了较多内容;色差部分补充后面要用的D光、F光、C光以及阿贝数等概念。在4.2.2节中,原线视场推导只针对像在无限远,给出的物方线视场与像方视场角的关系只适用像在无限远、渐晕系统50%的情况,本版进行了修订,给出了有限远、无限远以及各种渐晕情况下的视场推导,获得了任意成像位置、任意渐晕情况推导的普适公式,并获得了按成像于明视距离和成像于无限远两种情况推导任意渐晕时的直接计算公式。显微镜中的光束限制部分中,修改后视场部分扩展到渐晕问题,并补充相关重要公式。下部分物理光学中,在第5~8章中,对概念的完整性、印刷错误以及部分例题和习题进行了增删,物理光学基础一章的叙述更加简明易懂;光的偏振及晶体光学基础一章中关于光波和光线在晶体中的传播的解释及计算更加清晰明了。

本书由中国计量大学沈常宇和金尚忠编著,浙江大学冯华君教授主审。参加编写的有中国计量大学沈常宇(第1、2、5、6章),中国计量大学金尚忠、李晨霞(第10章),中国计量大学董前民(第8章),华南理工大学葛鹏(第4章),浙江大学雷华(第7章),中国计量大学李劲松(第9章),中国计量大学沈为民(第3章及第4章修改部分)。本书由沈常宇和金尚忠定稿。此外,中国计量大学井旭峰、张艳、李晓艳、楼俊、李晨霞、孔明审阅了本书,并提出了许多宝贵意见,在此一并致谢。

本书可作为高等学校光电信息科学与工程、电子科学与技术、光信息科学与技术、光学、

仪器仪表类专业的教材,亦可作为物理和测控技术及仪器专业的选修课教材,也可作为从事光学、光电技术、仪器仪表技术和精密测量及检测技术的工程技术人员的参考书。

由于作者水平有限,衷心希望广大读者对书中的不足之处给予批评指正。

编 者  
2017 年 7 月

# 第1版前言

## FOREWORD

本书是“十一五”浙江省重点建设教材,是根据高等教育教材规划以及经典光学原理内容的更新和反映现代光学技术和科技的发展和应用的的原则编写而成的。本书注重基本理论的论述,加强理论与工程实践的结合,并充分考虑当前光学原理教学过程中重点和难点,每章都提出了具体的学习目标,并针对每章的重点和难点,进行了例题分析和详解。

本书由上下两部分组成,上半部分为应用光学,共4章,系统地介绍了光学发展简史、几何光学基本原理和成像理论、光学系统的光阑及像差和典型光学仪器的基本原理;下半部分为物理光学,主要为波动光学的基本内容,共6章,主要内容包括物理光学基础、光的电磁理论、光的干涉、光的衍射、光的偏振与晶体光学基础、傅里叶光学及全息术以及光的度量、吸收、散射和色散等。

本书由中国计量学院沈常宇和金尚忠编著,浙江大学冯华君教授主审。参加编写的有中国计量学院沈常宇(第1、2、5、6章和附录),中国计量学院金尚忠(第10章),中国计量学院李晨霞(3.1,3.2节),中国计量学院孔明(3.3,3.4节),中国计量学院董前民(第8章),华南理工大学葛鹏(第4章),华南理工大学雷华(第7章),中国计量学院李劲松(第9章)。本书由沈常宇和金尚忠定稿。此外,中国计量学院李晨霞、井绪峰、楼俊、张艳、李晓艳、沈为民审阅了本书,并提出了许多宝贵意见,在此一并致谢。

本书可作为高等学校光电信息科学与工程、光信息科学与技术、电子科学与技术、仪器仪表类和其他相近专业的教材,亦可作为物理和测控技术及仪器专业的选修课教材或者参考书,也可作为从事光学、光电技术、仪器仪表技术和精密测量及检测技术的工程技术人员的参考书。

由于作者水平有限,衷心希望广大读者对书中的不足之处给予批评指正。

编 者

2013年1月

# 目 录

## CONTENTS

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....              | 1  |
| 1.1 光学发展简史 .....            | 1  |
| 1.2 本书的内容和知识框图 .....        | 7  |
| 第 2 章 几何光学基本原理 .....        | 8  |
| 2.1 几何光学的基本定律 .....         | 8  |
| 2.1.1 光线、光波与波面 .....        | 8  |
| 2.1.2 几何光学的基本定律 .....       | 9  |
| 2.1.3 费马原理——光线传播的普遍规律 ..... | 11 |
| 2.2 物、像的基本概念和完善成像条件 .....   | 12 |
| 2.3 单折射球面成像 .....           | 13 |
| 2.3.1 符号法则 .....            | 13 |
| 2.3.2 单个折射球面的光路计算公式 .....   | 13 |
| 2.3.3 近轴光线的光路计算 .....       | 14 |
| 2.3.4 单折射球面成像特性 .....       | 15 |
| 2.3.5 近轴条件下球面反射镜的物像关系 ..... | 16 |
| 2.4 折射球面成像系统 .....          | 17 |
| 2.5 理想光学系统 .....            | 19 |
| 2.5.1 理想光学系统基本概念 .....      | 19 |
| 2.5.2 理想光学系统的物像关系 .....     | 20 |
| 2.5.3 透镜成像 .....            | 26 |
| 2.6 平面反射镜与反射棱镜 .....        | 27 |
| 2.6.1 平面反射镜 .....           | 27 |
| 2.6.2 平行平板 .....            | 28 |
| 2.6.3 反射棱镜 .....            | 30 |
| 2.7 例题解析 .....              | 35 |
| 习题 .....                    | 39 |
| 第 3 章 光阑与像差 .....           | 43 |
| 3.1 光阑 .....                | 43 |
| 3.1.1 光阑的分类 .....           | 43 |
| 3.1.2 光阑的计算 .....           | 44 |
| 3.1.3 远心光路 .....            | 48 |
| 3.2 光学系统的景深 .....           | 50 |
| 3.3 像差概述 .....              | 52 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 3.3.1 轴上点球差 .....            | 53        |
| 3.3.2 轴外点像差 .....            | 55        |
| 3.3.3 色差 .....               | 60        |
| 3.3.4 波像差 .....              | 62        |
| 3.4 例题解析 .....               | 62        |
| 习题 .....                     | 64        |
| <b>第4章 典型光学仪器的基本原理 .....</b> | <b>66</b> |
| 4.1 眼睛 .....                 | 66        |
| 4.1.1 人眼构造 .....             | 66        |
| 4.1.2 眼睛的调节 .....            | 67        |
| 4.1.3 眼睛的缺陷和矫正 .....         | 68        |
| 4.1.4 眼睛的分辨率 .....           | 69        |
| 4.1.5 眼睛的对准 .....            | 69        |
| 4.2 放大镜 .....                | 69        |
| 4.2.1 放大镜的视觉放大率 .....        | 69        |
| 4.2.2 放大镜的光束限制和线视场 .....     | 70        |
| 4.3 显微镜系统 .....              | 71        |
| 4.3.1 显微镜的视觉放大率 .....        | 71        |
| 4.3.2 显微镜的分辨率 .....          | 72        |
| 4.3.3 显微镜中的光束限制 .....        | 73        |
| 4.3.4 工作距离 .....             | 74        |
| 4.3.5 显微镜的照明 .....           | 74        |
| 4.4 望远镜系统 .....              | 76        |
| 4.4.1 望远镜系统的结构 .....         | 76        |
| 4.4.2 望远镜系统的分辨率及有效放大率 .....  | 77        |
| 4.4.3 望远镜中的光束限制 .....        | 77        |
| 4.4.4 场镜 .....               | 78        |
| 4.5 例题解析 .....               | 79        |
| 习题 .....                     | 83        |
| <b>第5章 物理光学基础 .....</b>      | <b>85</b> |
| 5.1 光波的电磁理论描述 .....          | 85        |
| 5.1.1 光波的电磁特性 .....          | 85        |
| 5.1.2 光波的波动方程 .....          | 88        |
| 5.1.3 平面单色光波解 .....          | 88        |
| 5.1.4 平面波的性质 .....           | 90        |
| 5.1.5 球面波和柱面波 .....          | 90        |
| 5.1.6 群速度和相速度 .....          | 91        |
| 5.2 光的反射和折射的波动描述 .....       | 92        |
| 5.2.1 光在两电介质分界面上的反射和折射 ..... | 92        |
| 5.2.2 菲涅尔公式 .....            | 93        |
| 5.2.3 反射波和透射波的性质 .....       | 95        |
| 5.3 例题解析 .....               | 99        |
| 习题 .....                     | 101       |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第 6 章 光波的干涉 .....                  | 103 |
| 6.1 光波干涉的条件 .....                  | 103 |
| 6.1.1 光波的叠加 .....                  | 104 |
| 6.1.2 光波的干涉条件 .....                | 104 |
| 6.2 分波面干涉 .....                    | 105 |
| 6.3 影响双光束干涉条纹清晰度的因素 .....          | 108 |
| 6.3.1 两相干光波的振幅比对条纹对比度的影响 .....     | 108 |
| 6.3.2 光源宽度对条纹对比度的影响和空间相干性 .....    | 108 |
| 6.3.3 光源的非单色性对条纹对比度的影响和时间相干性 ..... | 110 |
| 6.4 分振幅双光束干涉 .....                 | 111 |
| 6.4.1 平行平板双光束等倾干涉 .....            | 111 |
| 6.4.2 楔形平板双光束等厚干涉 .....            | 113 |
| 6.5 典型双光束干涉系统及应用 .....             | 114 |
| 6.5.1 迈克尔逊干涉仪 .....                | 114 |
| 6.5.2 菲索干涉仪 .....                  | 115 |
| 6.5.3 泰曼-格林干涉仪 .....               | 116 |
| 6.5.4 马赫-曾德干涉仪 .....               | 117 |
| 6.5.5 傅里叶变换光谱仪 .....               | 117 |
| 6.6 多光束干涉及应用 .....                 | 118 |
| 6.6.1 平行平板的多光束干涉 .....             | 118 |
| 6.6.2 多光束干涉仪 .....                 | 120 |
| 6.7 例题解析 .....                     | 122 |
| 习题 .....                           | 125 |
| 第 7 章 光波的衍射 .....                  | 128 |
| 7.1 惠更斯-菲涅尔原理 .....                | 128 |
| 7.2 基尔霍夫衍射理论与索末菲衍射理论 .....         | 129 |
| 7.3 菲涅尔衍射和夫琅和费衍射 .....             | 130 |
| 7.4 典型孔径的夫琅和费衍射 .....              | 132 |
| 7.5 矩形孔径和单缝夫琅和费衍射 .....            | 133 |
| 7.6 圆形孔径的夫琅和费衍射 .....              | 135 |
| 7.7 多缝的夫琅和费衍射 .....                | 136 |
| 7.8 衍射光栅 .....                     | 139 |
| 7.8.1 光栅的色散 .....                  | 140 |
| 7.8.2 光栅的光谱分辨本领 .....              | 140 |
| 7.8.3 光栅的自由光谱范围 .....              | 141 |
| 7.9 光学成像系统的分辨本领 .....              | 142 |
| 7.10 菲涅尔衍射 .....                   | 145 |
| 7.11 干涉和衍射的区别和联系 .....             | 149 |
| 7.12 例题解析 .....                    | 149 |
| 习题 .....                           | 152 |
| 第 8 章 光的偏振与晶体光学基础 .....            | 157 |
| 8.1 偏振光概述 .....                    | 157 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 8.1.1 | 偏振光和自然光             | 157 |
| 8.1.2 | 从自然光获得偏振光的方法        | 160 |
| 8.1.3 | 马吕斯定律和消光比           | 162 |
| 8.2   | 晶体的双折射              | 162 |
| 8.3   | 双折射的电磁理论            | 164 |
| 8.3.1 | 晶体的各向异性与介电张量        | 164 |
| 8.3.2 | 单色平面波在晶体中的传播        | 166 |
| 8.4   | 晶体光学性质的图形表示         | 169 |
| 8.4.1 | 折射率椭球               | 169 |
| 8.4.2 | 折射率面和波矢面            | 172 |
| 8.4.3 | 法线面                 | 173 |
| 8.4.4 | 光线面                 | 174 |
| 8.5   | 平面光波在晶体表面的反射和折射     | 175 |
| 8.5.1 | 光在晶体表面的折射和反射定律      | 175 |
| 8.5.2 | 光在单轴晶体中传播方向的确定      | 176 |
| 8.6   | 晶体偏振器件              | 179 |
| 8.6.1 | 偏振棱镜                | 179 |
| 8.6.2 | 波片                  | 181 |
| 8.6.3 | 补偿器                 | 183 |
| 8.7   | 偏振的琼斯矢量表示           | 184 |
| 8.7.1 | 琼斯矢量                | 184 |
| 8.7.2 | 偏振态的琼斯矢量表示          | 184 |
| 8.7.3 | 偏振器件的琼斯矩阵表示         | 185 |
| 8.8   | 偏振光的干涉              | 189 |
| 8.8.1 | 平行光的偏光干涉            | 189 |
| 8.8.2 | 会聚偏振光的干涉            | 191 |
| 8.9   | 晶体的电光、磁光和声光效应及旋光性   | 193 |
| 8.9.1 | 电光效应                | 193 |
| 8.9.2 | 磁光效应                | 201 |
| 8.9.3 | 声光效应                | 205 |
| 8.10  | 例题解析                | 210 |
|       | 习题                  | 219 |
| 第9章   | 傅里叶光学及全息术           | 222 |
| 9.1   | 平面波的复振幅分布和空间频率      | 222 |
| 9.2   | 透镜的傅里叶变换性质和成像性质     | 224 |
| 9.2.1 | 透镜的相位变换作用           | 225 |
| 9.2.2 | 透镜的傅里叶变换性质          | 226 |
| 9.2.3 | 透镜的成像性质             | 229 |
| 9.3   | 相干成像系统及相干传递函数       | 230 |
| 9.4   | 非相干成像系统及光学传递函数*     | 231 |
| 9.4.1 | 非相干成像系统的光学传递函数(OTF) | 231 |
| 9.4.2 | 衍射受限系统的 OTF         | 232 |
| 9.5   | 阿贝成像理论与波特实验         | 234 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 9.5.1 阿贝成像理论                | 234        |
| 9.5.2 波特实验                  | 234        |
| 9.5.3 空间频谱滤波系统              | 235        |
| 9.5.4 空间滤波的傅里叶分析            | 236        |
| 9.5.5 滤波器的种类及应用举例           | 238        |
| 9.5.6 空间滤波的应用               | 239        |
| 9.6 全息术                     | 241        |
| 9.6.1 波前记录                  | 241        |
| 9.6.2 波前再现                  | 242        |
| 9.7 例题解析                    | 245        |
| 习题                          | 247        |
| <b>第 10 章 光的度量、吸收、散射和色散</b> | <b>249</b> |
| 10.1 辐射度量与光度量               | 249        |
| 10.1.1 辐射度量                 | 249        |
| 10.1.2 光度量                  | 250        |
| 10.1.3 光视效率                 | 252        |
| 10.1.4 颜色与视觉                | 253        |
| 10.2 光的吸收                   | 255        |
| 10.2.1 吸收定律                 | 255        |
| 10.2.2 吸收光谱                 | 256        |
| 10.3 光的色散                   | 257        |
| 10.4 光的散射                   | 259        |
| 10.4.1 瑞利散射                 | 259        |
| 10.4.2 米氏散射                 | 260        |
| 10.4.3 分子散射                 | 261        |
| 10.4.4 拉曼散射                 | 261        |
| 10.5 例题解析                   | 262        |
| 习题                          | 264        |
| 部分习题参考答案                    | 265        |
| 参考文献                        | 271        |

光学是物理学中最古老的一门基础学科,内容广泛,包括光的产生、传播和接收以及应用、光与物质的相互作用等。近半个世纪以来,它以令人惊讶的发展速度成为当前科学领域中最活跃的前沿阵地之一。光学的起源是怎样的?光学是怎么发展的?现在发展到了什么阶段?先了解一下光学的历史以及发展过程、光学的研究范畴以及光学的研究方法,对于光学基本知识的学习大有益处。

## 1.1 光学发展简史

光学的起源和力学等一样,可以追溯到 3000 年前甚至更早的时期。在中国,墨翟(公元前 468—公元前 376,见图 1.1.1)及其弟子所著《墨经》记载了光的直线传播和光在镜面上的反射等现象,并具体分析了物、像的正倒及大小关系。无论从时间还是科学性来讲,《墨经》可以说是世界上较为系统的关于光学知识的最早记录。约 100 多年后,古希腊数学家欧几里得(Euclid,约公元前 330—公元前 275)在其著作中研究了平面镜成像问题,提出了光的反射定律,指出反射角等于入射角,但他同时提出了将光当作类似触须的投射学说。



图 1.1.1 墨翟(公元前 468—公元前 376)

从墨翟开始的 2000 多年的漫长岁月构成了光学发展的萌芽期,这期间光学发展缓慢,东西方科学发展均受到很大压抑。这期间有克莱门德(Cleomedes, 公元 50 年)和托勒密(C. Ptolemy, 公元 90 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。阿拉伯学者阿勒·哈增(Al Hazen, 965—1038 年)写过一本《光学全书》,研究了球面镜和抛物面镜的性质,并对人眼的构造及视觉作用作了详尽的叙述;中国的沈括(1031—1095 年)撰写的《梦溪笔谈》对光的直线传播及球面镜成像做了比较深入的研究,并说明了月相的变化规律及月食的成因。法国的培根(R. Bacon, 公元 1214—1294)提出了用透镜矫正视力和采用透镜组构成望远镜的想法,并描述了透镜焦点的位置。

到 17 世纪,在经历了文艺复兴的大潮之后,科学在欧洲又进入一个蓬勃发展的时期,1621 年斯涅耳(W. Snell, 1591—1626 年)从实验中发现了折射定律,而笛卡儿(R. Descartes, 1596—1650)第一个把它归纳成解析表达式。1657 年费马(P. de Fermat, 1601—1665)提出了最小时间原理,并说明由此可推出光的反射和折射定律,至此几何光学的基础

已基本奠定。

人们对光学真正的深入实验和研究始于 17 世纪,荷兰的李普赛(H. Lippershey, 1587—1619)在 1608 年发明了第一架望远镜;17 世纪初,简森(Z. Janssen, 1588—1632)和冯特纳(P. Fontana, 1580—1656)最早制作了复合显微镜。1607 年,伽利略(G. Galilei, 1564—1642)试图测定光从一个山峰传到另一个山峰所用的时间。他让山顶上的人打开手中所持灯的遮光罩,作为发光的开始。又命第二个山峰上的人看到对方的灯光后立即打开己方灯的遮光罩。这样测定第一山峰上的人自发出光信号到看到对方灯光的时间间隔,便得到光在两个山峰间来回一次所需的时间。但是由于人的反应及动作时间远大于光运行所需的时间,伽利略的实验没有成功。1610 年伽利略用自制的望远镜观察星体,发现了绕木星运行的卫星,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。关于光的本性的认识,格里马第(F. M. Grimaldi, 1618—1663)首次注意到衍射现象。他发现光在通过细棒等障碍物时违背了直线传播的规律,在物体阴影的边缘出现蓝绿色亮、暗交替的或变化的彩色条纹。胡克(R. Hooke, 1635—1703)和玻意耳(R. Boyle, 1652—1691)各自独立地发现了现称为牛顿环的在白光下薄膜的彩色干涉图样,胡克还明确主张光由振动组成,每一振动产生一个球面并以高速向外传播,这可以认为是波动说的发端。到 17 世纪 60 年代末期,丹麦的巴塞林(E. Bartholin, 1625—1698)发现了光经过方解石时的双折射现象。17 世纪 70 年代荷兰的惠更斯(C. Huygens, 1629—1695, 见图 1.1.2)进一步发现了光的偏振性质。1690 年惠更斯在其著作《论光》中阐述了光的波动说,并提出了后来以他的名字命名的惠更斯原理。

1672 年,牛顿(I. Newton, 1643—1727, 见图 1.1.3)进行了白光的实验,发现白光通过棱镜时,会在光屏上形成按一定次序排列的彩色光带;于是他认为白光由各种色光复合而成,各色光在玻璃中受到不同程度的折射而被分解成许多组成部分。反之,把各种组成部分复合起来会重新得到原来的白光,并通过棱镜的形状和折射率来进行了定量的描述,使对颜色的解释摆脱了主观视觉的印象而上升到客观的色光特征;综合这些现象以及解释,1704 年,身为英国皇家学会会长的牛顿出版了自己一生中最重要的著作之一《光学》,提出了光的微粒流学说。他认为微粒从光源飞出,在真空或者均匀物质内由于惯性匀速直线运动,并以此解释了反射和折射定律。而在解释牛顿环时,却遇到了困难,同时这种学说也难以解释光绕过障碍物后所发生的衍射现象。但是牛顿的巨大声望使得微粒说在整个 18 世纪占据统治地位。



图 1.1.2 惠更斯(1629—1695)



图 1.1.3 牛顿(1643—1727)

光的理论在 18 世纪实际上没有什么进展,鉴于当时的认识水平,人们只能把光与两种传递能量的机械运动相类比,分别提出了关于光本性的两种学说:微粒说和波动说。光的微粒说由笛卡儿提出,得到牛顿的支持。它很容易解释直线传播定律和反射定律,也可以借助媒质对光微粒有作用力的假定去解释折射定律,得到光在折射率较大的媒质中传播速度

比较快的结论。然而,微粒说对干涉、衍射、偏振等现象解释相当勉强,以致牛顿不得不在微粒说中添加了“振动”因素,认为光在传播途中会受到媒质振动的影响。另外,与牛顿同时代的惠更斯综合了胡克等人的思想,于1678年比较系统地提出了光的波动说。该学说认为,光是一种特殊媒质——“以太”的波动。通过与机械波相比,波动说很容易定性的说明干涉和衍射的现象;如果加上惠更斯所作的“子波假设”,它也能定向地解释反射定律和折射定律。不过,由此导出的结论与微粒说相反,认为光在折射率较大的媒质中传播速度较慢。因为当时还不能在地面上测定光速,一时无法判断哪个结论正确。尽管总的来说波动说比微粒说显得更合理些,但一方面由于牛顿在科学界的威望,另一方面波动说当时还不能定量地说明干涉和衍射现象,甚至不能圆满地解释直线传播规律,使得多数科学家在17世纪和18世纪采纳了光的微粒学说。但是随着光的干涉、衍射和偏振等光的波动现象的发现,以惠更斯为代表的波动学说逐步提出来了。1801年,托马斯·杨(T. Young, 1773—1829, 见图1.1.4)最先用干涉原理解释了白光照射下薄膜颜色的由来和用双缝显示了光的干涉现象,并且第一次成功地测定了光的波长。1808年,马吕斯(E. L. Malus, 1775—1812)偶然发现光在两种介质面上反射时的偏振现象,随后菲涅尔和阿拉贡(D. Arago, 1786—1853)对光的偏振现象和偏振光的干涉进行了研究。1815年,菲涅尔(A. J. Fresnel, 1788—1827, 见图1.1.5)在并不了解杨氏工作的情况下,吸收了惠更斯的子波思想,并补充以干涉原理,提出了惠更斯-菲涅尔原理,成功地解释了衍射现象。1818年他以自己关于衍射的论文参加了法国科学院举行的征文竞赛,该原理用波动理论圆满地解释了光的直线传播规律,定量地给出了圆孔等衍射图形的强度分布。当时微粒说的支持者泊松(S. D. Poisson, 1781—1840)根据菲涅尔的理论,导出圆屏的阴影中央将出现亮斑的结论,他认为这很荒谬,试图以此否定波动说;然而,阿拉贡很快用实验证明了这个亮斑确实存在,使菲涅尔的理论获得了意外强有力的支持,由此引出了“泊松亮斑”的轶事,它为波动说的正确性提供了一个有力证据。1817年,杨氏明确指出,光波是一种横波(这次之前,惠更斯、菲涅尔等也曾有此设想),使一度被牛顿视为波动说障碍之一的偏振现象转化为波动说的一个佐证。至此,波动说的优势已是十分明显。1850年傅科(J. Foucault, 1819—1868)用旋转镜法测定光速,确定光在水中的速度比空气中要小(这是波动说所预言的结果),宣告波动说对微粒说取得了决定性的胜利。1873年,英国的麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879, 见图1.1.6)在总结法拉第(M. Faraday, 1791—1867)等人对电磁作用研究的基础上,加入了自己的假设,发表了“电磁论”,提出了后人所称的“麦克斯韦方程组”。根据该方程组,麦克斯韦预言,电磁场可以向外发射、传播,形成电磁波。他利用电磁学方法测到的数据,计算出电磁波的传播速度,发现在误差范围内该速度与实测的光速相同。以此为主要依据,麦克斯韦认为光波是一种电磁波。这就是光的电磁波理论。1888年,德国人赫兹(H. R. Hertz, 1857—1894)发现了射频范围



图 1.1.4 托马斯·杨(1773—1829)

图 1.1.5 菲涅尔(1788—1827)

图 1.1.6 麦克斯韦(1831—1879)