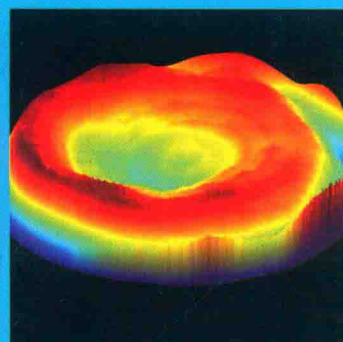
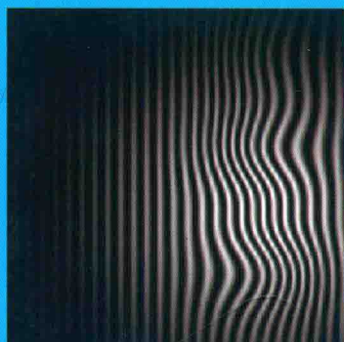
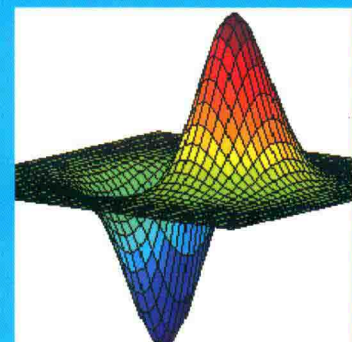


电类专业系列规划教材

# Advanced Interferometry and Application

# 先进干涉检测技术与应用

杨甬英 等 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

全国百佳图书出版单位

# 先进干涉检测技术与应用

杨甬英 等 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

先进干涉检测技术与应用 / 杨甬英等编著. —杭州:  
浙江大学出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-308-17109-0

I. ①先… II. ①杨… III. ①光学干涉仪—检测  
IV. ①TH744. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 163676 号

## 先进干涉检测技术与应用

杨甬英 等 编著

---

责任编辑 王 波

责任校对 汪荣丽

封面设计 续设计

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 浙江省良渚印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 25.25

字 数 614 千

版 印 次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-17109-0

定 价 52.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式 (0571)88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

# 高等院校光电类专业规划教材编委会

## 顾 问

庄松林 上海理工大学教授,中国工程院院士,国际光学工程学会和美国光学学会资深会员,中国仪器仪表协会理事长,中国光学学会理事,上海理工大学光学与电子信息工程学院院长

## 主 任

刘 旭 浙江大学教授,国家高等学校教学名师,长江特聘教授,中国光学学会副理事长,韩国光学学会荣誉会员,浙江省特级专家,浙江大学信息学部主任,国家现代光学仪器重点实验室主任

## 副主任委员

郁道银 天津大学教授,教育部电子信息与电气学科教学指导委员会副主任,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会主任,国家级教学名师

张雨东 中国科学院研究员,中国科学院成都分院院长,中国科学院光电技术研究所所长,中国科学院“百人计划”入选者

宋菲君 中国科学院研究员,总工程师,大恒新纪元科技股份有限公司副总裁,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员,中国光学学会常务理事

## 委 员 (按姓氏笔画排序)

王晓萍 浙江大学教授,光电信息工程学系副主任,全国大学生光学设计竞赛副秘书长

王 健 研究员,浙江大学兼职教授,聚光科技股份有限公司总工程师,董事长

毛 磊 高级工程师,香港永新光电实业有限公司副总经理,宁波永新光学股份有限公司总经理

付跃刚 长春理工大学教授,光电工程学院副院长,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员

- 白廷柱 北京理工大学教授,光电学院光电工程系光电成像与信息工程研究所副所长,光电信息工程专业本科生责任教授
- 刘卫国 西安工业大学教授,副校长,电气工程及其自动化专业教学指导分委员会委员
- 刘向东 浙江大学教授,教务处处长,教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会副主任,全国大学生光电设计竞赛秘书长
- 杨坤涛 华中科技大学教授,教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会副主任
- 何平安 武汉大学教授,电子信息学院光电信息工程系主任,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员
- 陈延如 南京理工大学教授,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员
- 陈家璧 上海理工大学教授,国际光学学会(SPIE)会员,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员
- 曹益平 四川大学电子信息学院光电科学技术系主任,研究员,光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员
- 谢发利 教授级高级工程师,福建福晶科技有限公司总经理
- 蔡怀宇 天津大学教授,中国光学学会光电技术专业委员会委员,中国光学学会光学教育专业委员会委员
- 谭峭峰 清华大学精仪系光电工程研究所副研究员,中国光学学会光学教育专业委员会常务委员

# 序

现代社会科技、经济进步的重要推动力之一是信息科学与技术学科的发展。光学工程学科是依托光与电磁波基本理论和光电技术,面向信息科学基本问题与工程应用的一门学科,是信息科学与技术一个重要的分支学科。自1952年浙江大学建立国内高校第一个光学仪器专业以来,我国光学工程学科的本科人才培养已经历了半个多世纪的发展,本科专业体系逐渐完善。为顺应光学工程学科和光电信息产业的不断发展,国内许多高校设立了光学工程本科相关专业,并在教育部教学指导委员会的重视和指导下,专业人才培养质量稳步提高。

但是目前在本科专业建设方面,还存在着专业特色不突出、学生光学工程能力培养欠缺、优秀教材系列化程度不足等问题。为此浙江大学光电系和浙江大学出版社发起并联合多所高校、企业编著了一套“高等院校光电类专业系列规划教材”,既包括了光学工程教育体系的主要内容,又整合了光电技术领域的专业技能,突出实践环节,充分体现光学工程学科的数理特征、行业特征以及国内外光学工程研究与产业发展的最新成果和动态,增强了学科发展与社会需求的协同性。

“高等院校光电类专业系列规划教材”不仅得到了教育部高等院校光电信息科学与工程专业教学指导分委员会、中国光学学会、浙江大学、长春理工大学、西安工业大学等单位的大力支持,邀请了专业知名学者、优秀工程技术专家参与,教指委专家审定,同时还吸取了多届校友和在校学生的宝贵意见和建议,是结合国际教学前沿、国内精品教学成果、企业实践应用的高水平教材,不仅有助于系统学习与掌握光学工程的理论知识,也与时俱进地顺应了光电信息产业对光学工程学科的人才培养要求,必将对培养适应产业技术进步的高素质人才起到积极的推动作用,为我国高校光学工程教育的发展和学科建设注入新的活力。

中国工程院院士

# 前 言

先进干涉检测技术是将经典的干涉系统与当前各种新颖的光电子器件及机电系统、高速发展的计算机技术紧密结合,从而实现目标信息多参数三维空间高精度检测的综合性技术。其在国防及国民经济、微电子、材料及生物医学各领域都有着广泛的应用。

本书以光的干涉、衍射、偏振及电磁波理论为基础,系统全面地介绍了各种先进干涉技术及应用。全书内容共分10章。第1章光及光的干涉,阐述了光的特性及光干涉的基本概念;第2章常见干涉仪,介绍了一些最基础及常用的干涉仪;第3章共路干涉仪,简要介绍了散射板、剪切干涉及点衍射等共路型的干涉仪;第4章非球面检测技术,系统地介绍了非球面的基本概念、非球面的零位与非零位检测及各种新颖的波前重构算法;第5章精密长度及振动测量干涉体系,全面介绍了激光干涉测长、测振系统的工作原理、外差测长技术及纳米测试技术中的谐振增强技术;第6章干涉相位调制及解调技术,系统介绍了各种新颖的、商用化的干涉仪的相移技术、时间相位调制、空间相位调制及偏振相移技术等;第7章干涉系统应用中的精密扫描与定位系统,介绍了干涉检测中常用的压电晶体及其性质、各种新颖的压电晶体在精密干涉移相、扫描定位及纳米检测中的应用;第8章新型干涉仪,系统介绍了光纤干涉仪、双光子干涉仪、全息干涉仪等新颖干涉仪;第9章干涉光谱技术,介绍了光谱技术的发展及分类、F-P干涉仪、干涉成像光谱仪、高光谱分辨率激光雷达滤光器等光谱技术;第10章干涉图分析中的关键技术,系统地介绍了典型干涉图及表达方法、干涉图预处理、相位解调、解包裹处理、正交多项式拟合等波前重构的算法。全书理论分析严谨、实例新颖丰富,汇集了作者数十年科研成果及教学经验。

本书列入浙江大学光电学院与浙江大学出版社联合多所高校进行优秀教材系列化建设的“高等院校光电类专业系列规划教材”,可以作为光学、光电信息工程、光电检测及干涉计量的大专院校本科生、研究生的专业课教材,也是相关科研单位专业人员的科研参考书。

本书由浙江大学杨甬英教授等编撰,其中密歇根大学田超博士后编撰了第8、10章。张磊、凌瞳、陈晓钰、师途、成中涛、罗敬、王晨、周雨迪、种诗尧、李瑶、岳秀梅诸位博士参与了大量的资料收集、整理及编撰的相关工作,师途博士进行了教材初稿至定稿的整理和联络。各位为教材的顺利完稿做出了贡献,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥或疏漏之处,诚请各位专家和读者批评指正。

杨甬英

2017年5月于求是园

# 目 录

第 1 章 光及光的干涉 .....	1
1.1 光及光的特性 .....	1
1.1.1 光学简史 .....	1
1.1.2 光的电磁理论 .....	4
1.1.3 偏振 .....	14
1.1.4 光场叠加及干涉条件 .....	23
1.1.5 衍射 .....	26
1.2 光的干涉 .....	34
1.2.1 干涉条纹对比度与光的相干理论 .....	34
1.2.2 实际光波的干涉 .....	43
1.2.3 分波前法干涉 .....	44
1.2.4 分振幅法干涉 .....	48
1.2.5 干涉仪中的瞳和窗 .....	58
习题 .....	70
参考文献 .....	71
第 2 章 常见干涉仪 .....	72
2.1 牛顿干涉仪 .....	72
2.1.1 牛顿干涉仪基本原理 .....	72
2.1.2 光学车间检验中的牛顿干涉仪应用 .....	74
2.2 迈克耳逊干涉仪 .....	77
2.2.1 迈克耳逊干涉仪基本原理 .....	77
2.2.2 迈克耳逊干涉仪应用 .....	79
2.3 菲索干涉仪 .....	82
2.3.1 菲索干涉仪基本原理 .....	82
2.3.2 Fizeau 干涉仪应用实例:ZYGO 干涉仪 .....	84
2.4 泰曼—格林干涉仪 .....	87
2.4.1 泰曼—格林干涉仪基本原理 .....	87



2.4.2	Twyman-Green 干涉仪应用 .....	89
2.5	瑞利干涉仪 .....	91
2.5.1	瑞利干涉仪基本原理 .....	91
2.5.2	瑞利干涉仪测定气体折射率 .....	93
2.6	马赫—曾德干涉仪 .....	94
2.6.1	马赫曾德干涉仪基本原理 .....	95
2.6.2	马赫曾德光纤传感 .....	97
2.7	法布里—珀罗干涉仪 .....	99
2.7.1	法布里—珀罗干涉仪原理 .....	99
2.7.2	主要应用 .....	100
	习题 .....	104
	参考文献 .....	105
<b>第3章</b>	<b>共路干涉仪 .....</b>	<b>107</b>
3.1	散射板干涉仪 .....	107
3.1.1	散射板干涉仪基本原理 .....	107
3.1.2	散射板干涉仪干涉光强分布 .....	109
3.2	剪切干涉仪 .....	112
3.2.1	平行平板横向剪切干涉仪 .....	112
3.2.2	萨瓦偏振镜干涉仪 .....	113
3.2.3	渥拉斯顿棱镜干涉仪 .....	113
3.2.4	交叉光栅横向剪切干涉仪 .....	114
3.2.5	波带片径向剪切干涉仪 .....	115
3.2.6	环形径向剪切干涉仪 .....	115
3.3	双焦干涉仪 .....	116
3.3.1	双焦干涉仪基本原理 .....	116
3.3.2	双焦干涉轮廓仪 .....	118
3.4	点衍射干涉仪 .....	120
3.4.1	点衍射干涉仪原理 .....	121
3.4.2	点衍射干涉仪的应用 .....	124
3.5	米勒干涉仪 .....	126
	习题 .....	128
	参考文献 .....	129
<b>第4章</b>	<b>非球面检测技术 .....</b>	<b>130</b>
4.1	非球面的基本概念 .....	131
4.1.1	非球面的定义与分类 .....	131
4.1.2	非球面的性质 .....	133

4.2	非球面零位检测 .....	136
4.2.1	无像差点法 .....	136
4.2.2	零位补偿镜检测技术 .....	138
4.2.3	计算全息零位检测 .....	139
4.3	非球面的非零位检测 .....	141
4.3.1	非零位检测技术 .....	141
4.3.2	部分补偿干涉检测 .....	147
4.3.3	子孔径干涉检测 .....	150
4.4	组合干涉检测技术 .....	155
4.4.1	零位检测与零位检测的组合 .....	155
4.4.2	零位检测与子孔径拼接检测的组合 .....	156
4.4.3	非零位检测与非零位检测的组合 .....	158
4.5	面形误差的重构 .....	161
4.5.1	基于二倍关系的重构 .....	161
4.5.2	基于理论波前的重构 .....	163
4.5.3	基于逆向迭代的重构 .....	165
4.5.4	误差分析 .....	169
4.6	子孔径拼接技术 .....	170
4.6.1	拼接算法 .....	170
4.6.2	子孔径划分 .....	174
4.6.3	子孔径拼接误差分析 .....	177
4.6.4	NASSI 子孔径拼接与面形重构 .....	179
	习题 .....	183
	参考文献 .....	184
<b>第 5 章</b>	<b>精密长度及振动测量干涉体系 .....</b>	<b>190</b>
5.1	激光干涉测长技术 .....	191
5.1.1	激光干涉测长系统的工作原理 .....	191
5.1.2	激光光源的模式选择 .....	192
5.1.3	干涉测长的动镜选择 .....	194
5.1.4	干涉体系的可逆计数及移相 .....	201
5.1.5	白光干涉定位技术 .....	204
5.2	激光干涉测振技术 .....	207
5.2.1	激光干涉测振系统校准原理 .....	207
5.2.2	频率比测振 .....	209
5.2.3	贝塞尔函数测振 .....	210
5.3	外差技术 .....	211

5.3.1	外差测长原理 .....	212
5.3.2	外差测长的关键技术 .....	214
5.3.3	外差测长的应用 .....	216
5.4	纳米测试技术中的谐振增强技术 .....	217
5.4.1	AFM 直流测量技术 .....	217
5.4.2	微弱信号检测的锁相技术 .....	218
5.4.3	AFM 谐振增强技术 .....	220
	习题 .....	222
	参考文献 .....	223
<b>第 6 章</b>	<b>干涉相位调制及解调技术 .....</b>	<b>224</b>
6.1	时间相位调制及解调技术 .....	224
6.1.1	基本原理 .....	224
6.1.2	时间相位调制的实现方法 .....	225
6.1.3	时间相位解调方法 .....	227
6.2	空间相位调制及解调技术 .....	236
6.2.1	空间线性载波及解调 .....	237
6.2.2	频域泄漏效应的影响及处理 .....	239
6.2.3	环形径向剪切干涉测量系统 .....	245
6.3	偏振相位调制技术 .....	247
6.3.1	基本原理 .....	247
6.3.2	正交线偏振光相位调制系统 .....	250
6.4	同步移相技术 .....	254
	习题 .....	258
	参考文献 .....	258
<b>第 7 章</b>	<b>干涉系统应用中的精密扫描与定位系统 .....</b>	<b>262</b>
7.1	压电效应 .....	263
7.1.1	压电效应和压电晶体 .....	263
7.1.2	压电陶瓷逆压电效应的性质 .....	264
7.2	压电叠堆扫描系统 .....	266
7.2.1	压电扫描位移模块 .....	266
7.2.2	压电扫描控制 .....	269
7.3	压电扫描微位移器检测 .....	270
7.4	压电扫描微位移器应用举例 .....	275
7.5	压电直线电机 .....	278
7.5.1	蠕动式压电直线电机 .....	279
7.5.2	冲击式压电直线电机 .....	281

7.6 柔性铰链压电系统 .....	282
7.6.1 柔性铰链的基本模型结构 .....	283
7.6.2 柔性铰链压电扫描系统 .....	284
7.7 各种精密扫描与定位系统的比较 .....	285
习题 .....	286
参考文献 .....	286
<b>第8章 新型干涉仪 .....</b>	<b>288</b>
8.1 偏振光干涉仪 .....	289
8.1.1 偏振光干涉原理 .....	289
8.1.2 偏振光干涉仪及应用 .....	291
8.2 光纤干涉仪 .....	294
8.2.1 光纤基础知识 .....	294
8.2.2 常见光纤干涉仪 .....	297
8.2.3 光纤干涉仪的典型应用 .....	299
8.3 全息干涉仪 .....	302
8.3.1 全息基本原理 .....	303
8.3.2 全息干涉技术 .....	305
8.3.3 全息干涉仪的典型应用 .....	307
8.4 散斑干涉仪 .....	309
8.4.1 散斑基础 .....	309
8.4.2 散斑干涉测量 .....	310
8.4.3 散斑干涉仪的典型应用 .....	313
习题 .....	315
参考文献 .....	315
<b>第9章 干涉光谱技术 .....</b>	<b>316</b>
9.1 光谱仪器常见术语 .....	317
9.1.1 自由光谱区 .....	317
9.1.2 分辨本领 .....	317
9.1.3 光谱仪亮度和聚光本领 .....	318
9.2 光谱技术的发展及分类 .....	318
9.2.1 色散型光谱仪 .....	319
9.2.2 干涉型光谱仪 .....	319
9.2.3 其他的新型光谱仪 .....	320
9.3 干涉光谱技术 .....	321
9.3.1 空间分离型干涉光谱技术 .....	322
9.3.2 傅里叶变换干涉光谱技术 .....	325

9.4	干涉(傅里叶变换)成像光谱技术 .....	332
9.4.1	时间调制型干涉成像光谱仪 .....	333
9.4.2	基于三角共路(Sagnac)分束器的空间调制型干涉成像光谱仪 .....	334
9.4.3	基于偏振器件的空间调制型干涉成像光谱仪 .....	337
9.4.4	小结 .....	339
9.5	基于广角迈克尔逊干涉仪的干涉成像光谱仪 .....	340
9.5.1	概述 .....	340
9.5.2	广角迈克尔逊干涉仪的基本原理 .....	340
9.5.3	被动大气遥感中的广角迈克尔逊干涉仪 .....	342
9.6	高光谱分辨率激光雷达 .....	343
9.6.1	概述 .....	343
9.6.2	FP 滤光器 .....	346
9.6.3	FWMI 滤光器 .....	351
9.6.4	FPI 和 FWMI 滤光器在 HSRL 中性能的比较 .....	353
	习题 .....	356
	参考文献 .....	356
<b>第 10 章</b>	<b>干涉图分析中的关键技术 .....</b>	<b>360</b>
10.1	迈克尔逊干涉图及其表示 .....	361
10.2	单幅闭合干涉图相位解调技术 .....	364
10.2.1	单幅闭合干涉图相位解的不唯一性 .....	364
10.2.2	正则化相位跟踪技术 .....	365
10.2.3	路径无关正则化相位跟踪技术 .....	367
10.2.4	正交多项式相位拟合技术 .....	369
10.3	两幅随机相移干涉图相位解调技术 .....	373
10.4	相位解包裹技术 .....	375
10.4.1	一维相位解包裹 .....	375
10.4.2	二维相位解包裹 .....	377
10.5	正交多项式波面拟合技术 .....	379
10.5.1	Zernike 多项式 .....	379
10.5.2	Zernike 多项式在非圆域上的正交化 .....	381
10.5.3	Zernike 多项式波面拟合 .....	386
	习题 .....	387
	参考文献 .....	388

### 1.1 光及光的特性

#### 1.1.1 光学简史

光是一种重要的自然现象,由于其与人类生活和社会实践的密切联系,光学是一门很早就发展起来的学科。在此简短地概述光学的发展历史,以人类对于光本性的观念探讨为主线,从这一段漫长的发展历程中理出四条主要线索:初始时期(反射光学和折射光学),波动论与微粒论之争,光的电磁理论和光的量子理论。

##### 1. 初始时期

光学的起源可以追溯到远古。最早的光学仪器是镜子,之后出现了用于点火和放大的透镜。古希腊哲学家已经熟悉光的直进、光的反射定律和光的折射现象,这引起他们对光的本性的深思,发展了几种关于光本性的理论。

之后黑暗的中世纪开始了,欧洲在很长一段时间几乎没有什么科学进步,学术中心转移到了阿拉伯世界,光学处于休眠中,在此期间阿尔哈增(Alhazen)精密地表述了光的反射定律。

13 世纪后半叶,培根(R. Bacon)有了用透镜来改善视觉的想法,甚至暗示过把透镜组合起来构成望远镜的可能性。15 世纪达·芬奇(Da Vinci)描述了成像暗箱(camera obscura)。17 世纪初,望远镜和显微镜得以发明。

1611 年,开普勒(J. Kepler)发表了著作《折光学》,他发现了全内反射,得出了折射定律的小角度近似,发展了一种对薄透镜系统的一级光学的处理方法。1621 年,莱顿大学教授斯涅耳(W. Snell)在实验上发现了折射定律,之后笛卡尔(R. Descartes)用正弦函数的形式将折射定律表述出来,这是光学中的重要事件之一,一举打开了近代光学应用的大门。笛卡尔系统地陈述了关于光的本性的见解,认为光在本质上是一种压力,在一种完全弹性的、充满一切空间的媒质(以太)中传递。1657 年,费马(P. Fermat)提出了著名的最小时间原理,即光永远选择这样一条路,以使它在最短时间内抵达目的地,他由此出发推导了反射和折射定律。

这段时期是光学的初始阶段,在这样一个漫长的历史时期内,人类的光学知识仅限于一些现象和简单规律的描述,对于光本性的认真探讨是从 17 世纪开始的。

## 2. 波动说与微粒说之争

17世纪,光的衍射现象——几何影区里的光,和光的干涉现象——薄膜产生的彩色干涉图样,为人所发现。胡克(R. Hooke)提出,光是媒质中一种迅速的振动,它以极大的速度传播,并且在均匀媒质中每个振动都将产生一个圆球,这个圆球将稳恒地向外扩大。这是波动说的发端,胡克以此来解释薄膜产生的彩色干涉条纹,并试图用这些概念来解释折射现象和颜色。

1666年牛顿(I. Newton)发现了棱镜的色散现象,白光分解成各种独立的颜色,他确定每一种颜色各由一个折射率来标志,颜色的基本性质搞清楚。但是,波动理论在光的直进和偏振方面遇到的困难使牛顿趋向于光的微粒理论,认为光是以微小粒子的形式从发光物体传播出来的,按照惯性定律沿直线飞行。这直接说明了光的直线传播定律,并且反射定律和折射定律也能在光的微粒模型的基础上加以解释。然而,微粒说在解释光的折射定律时,得出了光在水中的速度大于在空气中的错误结论,不过当时的科学技术条件不能通过实验测定来鉴别。

虽然微粒理论解释了光通过自由空间的传播,并且能用来预言反射定律和折射定律的正确形式,但是在试验中观察到的干涉、衍射、偏振等现象,是无法用描述光的经典的微粒模型来解释的,在光的波动模型的基础上才能令人满意地解释这些现象。

在牛顿发展微粒说的同时,惠更斯(C. Huygens)对波动理论大加改进扩充,认为光是在一种特殊弹性媒质(以太)中传播的机械波,并且提出一个原理,光扰动所落到的“以太”的每一点,可以看作是一个新扰动的中心,各向外发射一个球面波,这些次级波的包络面决定以后任何时刻的波阵面。借助这个原理,惠更斯成功地推导出反射定律和折射定律。惠更斯还能够说明双折射现象,并且在研究这个问题的过程中发现了光的偏振,但并未能给出解释。但是,牛顿的至高无上的权威使得当时的人们对微粒理论深信不疑,他对波动理论的摒弃使得这一理论停滞不前近一个世纪。

直到19世纪初叶,一些决定性的发现导致人们普遍接受波动理论。19世纪初,杨氏(T. Young)做了一个著名的干涉实验——杨氏双缝干涉,据此提出干涉原理并对薄膜彩色和牛顿环的成因做出解释,但由于其见解大部分是定性表达,所以没有获得普遍承认。在1816年前后,菲涅尔(A. J. Fresnel)综合了惠更斯的波动描述和干涉原理两个概念,将波的传播看成是相继激发出的一系列球面次级子波相互叠加干涉而成。菲涅尔对其理论进行了数学的论证,令人信服地解释了衍射现象,计算了各种障碍物和小孔产生的衍射图样,并且满意地解释了均匀各向同性媒质中光的直进。菲涅尔和阿喇果(D. F. Arago)实验研究了偏振对干涉的作用,于1816年发现偏振方向相互垂直的两束光从不干涉,杨氏由此提出了光波是横波的假设。在此基础上,菲涅尔发展了弹性以太理论,用以太振动模型推导出了反射光和透射光的振幅和偏振所服从的规律。菲涅尔的工作为光的波动论奠定了牢固的基础。

1850年傅科(L. Foucault)实验测量了空气和水中的光速。微粒说要求光密媒质中的光速比较大,而波动说要求光密媒质中的光速比较小。实验测量了空气和水中的光速,结果判定波动说获胜,这再次给微粒说一个沉重的打击,波动理论为人们所普遍接受,取得了牢固的地位。

惠更斯、菲涅尔的波动理论的弱点在于带有机械论的色彩,把光现象看成某种机械运动过程,认为光是一种弹性波,这就必须臆想一种特殊的弹性介质“以太”充满空间。为了不与观测事实抵触,必须赋予以太极其矛盾的属性:密度极小且弹性模量极大。这不仅在实验上无法证实,在理论上也显得荒唐,所以需要摆脱弹性以太的概念。至此,虽然许多光学问题获得了解决,但是光学的基础还停留在不能令人满意的状态。

### 3. 光的电磁理论

在19世纪,电学和磁学也得到了发展。1820年,奥斯特(Oersted)发现了电流的磁效应。不久,安培(Ampere)发现了两根通电的平行导线互相吸引。大约在1831年,法拉第(M. Faraday)通过实验成功地证明了变化的磁场能够感生出电动势,电磁学的研究随着法拉第电磁感应定律的发现达到最高峰。19世纪中叶,麦克斯韦(J. C. Maxwell)推广了安培定律,指出变化的电场也能够感生出磁场,并且天才地总结了所有已知的电磁学的经验知识,得到一组简洁、优美而对称的数学方程,即麦克斯韦方程组。他从这个方程组导出了波动方程,指出电磁场能够作为一个横波在以太中传播,并且其传播速度能够从纯电磁学测量的结果计算出来。后来有人完成了这些测量,麦克斯韦根据测量的数据计算出电磁波在空气中的速度,他发现这个值非常接近于斐索(Fizeau)在1849年测得的光速值。这启发了麦克斯韦,提出了光的电磁理论,认为光是一种电磁现象,是以波的形式传播的电磁扰动,在光波中存在着变化的电场和磁场,变化的磁场产生变化的电场,变化的电场又产生变化的磁场,使得电磁波在空间中传播。1888年,赫兹(H. Hertz)成功地进行了产生和探测电磁波实验,证实了麦克斯韦的电磁理论。

光的波动说是基于一种无所不在的媒质即以太的存在以作为支承这个波的媒质,这要求以太具有一些相当奇怪的物理性质,它必须相当稀薄,但又有着非常强的恢复力。而之后的实验表明不可能观察到地球相对于以太的运动任何效应,以太绝对静止的假设失败了。1905年,爱因斯坦建立狭义相对论,否定了以太假说,革除了以太概念。一直以来,人们对一切自然现象的认识都带有机械论的局限性,认为电磁波是充满空间的弹性介质以太中的波动现象,该弹性介质构成电磁波传播的特殊参考系。以太绝对静止被实验否定的事实和相对性原理的建立使物理学家放弃寻求用机械模型解释电磁波,接受电磁波能通过自由空间传播的观念,电磁波是作为物质的电磁场本身的运动形式,本身成了一种实体。

至此人们对电磁场的认识产生了一个飞跃,而光学建立在了电磁理论的宏伟结构之上。19世纪末的物理学家们普遍认为,人们已经最终地理解了光究竟是什么。

### 4. 光的量子理论

光的电磁理论能够解释一切和光的传播有关的现象(就其主要特征而言),然而不能说明光的发射过程和吸收过程。在这些过程中,物质和光波场相互作用的精细面貌被显现出来。支配这些过程的规律是近代物理学探讨的目标。

这段历史是从发现光谱中的某些规律开始的。19世纪初,夫琅禾费(J. Fraunhofer)发现了太阳光谱中的暗线,之后的实验和分析将这些暗线归属于吸收线。这个发现是光谱分析的开端,光谱分析一直到现在仍是物理学研究的重要课题。每种原子都有它独有的一组



特征的光谱线,这关乎光如何在原子中产生或消灭的问题,涉及原子本身的结构。

1900年,为了解决黑体辐射理论的矛盾,普朗克(M. Planck)提出了量子假说,认为各种频率的电磁波,只能像微粒似的以一定最小份额的能量发生,该份额即量子 $\epsilon=h\nu$ ,与频率 $\nu$ 成正比,其中 $h$ 叫作普朗克常数,它的出现是近代物理学区别于经典物理学的标志。普朗克始发了科学思潮中另一场大革命——量子理论。

1905年,爱因斯坦(A. Einstein)根据普朗克理论,使光的微粒理论在一种新形势下复活起来,即提出著名的光子理论。按照光子理论,假设普朗克的能量量子作为实在的光粒子存在,这种光粒子叫作“光子”,其能量仅依赖于光的频率,由此他成功地解释了光电效应,即如果光的频率高于某一临界值,被光照射的金属表面会有电子逸出,而且逸出电子能量与光的强度无关,但与光频率有关。爱因斯坦还指出,光子除了具有能量外,还应该具有动量,这一结论为1923年康普顿(Compton)的实验所证实,这个实验称为康普顿效应。

1913年,玻尔(N. Bohr)把量子理论应用到原子结构,提出了氢原子的一个初步的量子理论,成功地解释了氢原子发射光谱的波长。这个理论以令人难以置信的精密和美丽描述了最微小的细节。之后,在一大批杰出的物理学家的共同努力下,量子力学成为一个得到很好验证的理论体系,依靠量子力学,人们对原子和分子的构造获得了重要的认识。而场与物质相互作用的详细理论,需要把量子力学方法的领域加以扩大(场量子化)。对于电磁辐射场,这项工作首先是由狄拉克(P. Dirac)做出的,这些研究形成了量子光学的基础。

光是微粒还是波动?这个古老的争论再次摆在我们面前。有些实验只有在辐射的微粒性的基础上才能加以解释,必须承认波动理论和微粒理论两者同时有效。“粒子”和“波动”都是经典物理的概念,在宏观世界里是明显地互相排斥的,在微观世界里却必须合并在一起。近代的科学实践证明,光是十分复杂的课题。对于其本性的问题,只能用它所表现出来的性质和规律来回答:光在某些方面的行为表现出粒子的性质,在另一些方面的行为表现出波动的性质。光的微粒性同波动性通过近代量子理论统一起来,这就是所谓的“波粒二象性”。

以上我们回顾了人类对于光之本性的见解的发展历程,至此,光学现象背后的物理原理大体上系统形成了。光学这一研究光的传播和它与物质相互作用问题的学科,不仅是物理学中一门重要的基础学科,也是一门应用性很强的学科。

从20世纪40年代开始,光学在概念、方法和应用方面取得了一系列重大的突破和进展。1948年全息术的发明,1955年作为光学系统像质评价标准的光学传递函数概念的建立,1960年激光器的诞生,是现代光学发展中有重要意义的三件大事。而现代光学最重大的进展之一是引入了傅里叶(Fourier)变换的概念,建立了傅里叶光学理论和光学信息处理技术。这些进展在研究方法和装置仪器方面极大地丰富了光学的内容。

几乎可以用于测量任何变量的光学技术和器件得以发明和应用,并持续快速地发展着,其中光的干涉目前仍是精密测量中难以替代的手段。

### 1.1.2 光的电磁理论

光学是研究光的传播以及它和物质相互作用问题的学科。光学由于量子理论的发现经历了一场彻底的革命,深深地影响了关于光的本性的见解,但是它并没有使早先的理论和技