

# 成像光学导论

廖延彪 编著

清华大学出版社



# 成像光学导论

廖延彪 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

光学成像技术是信息化时代的重要内容之一,应用领域愈来愈广。本书基于光学成像技术的发展现状,对成像光学的基本原理作了较全面的介绍。本书的主要内容包括:几何光学成像;光纤成像;衍射成像;扫描成像;遥感成像;高速摄影;软 X 射线和极紫外光显微成像;计算机层析成像;近场光学成像;综合孔径成像;编码孔成像;图像处理;图像接收、记录和显示。本书是一本较全面地介绍光学成像的书籍。

本书选材广泛,既全面反映了现代光学成像的最新发展,又有一定深度。本书可作为高校物理电子和光电子、光学、光学仪器等专业的本科生和研究生的教材或参考书,也可供相关专业技术人员参考。

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

成像光学导论/廖延彪编著. —北京:清华大学出版社,2008.11

ISBN 978-7-302-17890-3

I. 成… II. 廖… III. 成像 IV. O435.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 088878 号

责任编辑:王敏稚

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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)

印 刷 者:北京国马印刷厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:19.75 字 数:481 千字

版 次:2008 年 11 月第 1 版 印 次:2008 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:32.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:026962-01

# 前 言

光学成像技术是信息化时代的重要内容之一。随着计算机技术、光电子技术以及电子技术的飞速发展,光学成像技术也已获得巨大的进步,应用领域愈来愈广,而且其发展直接影响到许多行业的进步。但是目前不足的是,缺少一本较全面介绍成像光学的基本原理及其进展的教材。这本教材能够使读者了解成像光学的基本理论,而且通过学习,为今后光学成像技术创新工作打下一个良好的基础。

本书较全面地介绍了现代成像光学的基本内容——经典的和现代的,其中包括:几何光学成像;光纤成像;衍射成像;扫描成像;遥感成像;高速摄影;软X射线和极紫外光显微成像;计算机层析成像技术;近场光学成像;综合孔径成像;编码孔成像;图像处理;图像接收、记录和显示。

本书的编写目的有二:一为教材,二为参考书。作为教材,书中内容可按教学大纲有所取舍。其中,几何光学成像,光纤成像,衍射成像,图像处理,图像的接收、记录和显示可作为基本内容,重点讲述;光层析成像等内容则作为一般了解内容,可仅作简要介绍;有些内容,可根据学生已有的知识基础,作为自学内容。建议课上教师以讲清楚物理概念为主,使学生了解各类光学成像的基本原理,其余可作为自学的阅读材料,为学生在今后对于光学成像技术的应用打下必要的基础。作为参考书,本书可作为各领域相关读者系统而全面地了解光学成像技术的参考读物。

- 本书较全面地介绍了光学成像的基本原理与技术,不仅包括传统的几何光学成像的基本原理与技术,还包括光纤光学成像的基本原理与技术,衍射光学成像的基本原理与技术,以及近代出现的光层析成像的基本原理与技术,遥感光学成像的基本原理与技术,近场光学成像的基本原理与技术等。
- 本书着重讨论一些重要的光学成像原理,目的是便于读者在今后工作过程中能根据实际需要选用合理的成像技术,或进一步建立有关成像过程的物理模型,对所得成像结果能给予正确、合理的解释。
- 本书不仅较全面地介绍了光学成像的基本原理,作者还根据多年科研和教学工作的经验,给读者介绍了实用中需要了解的光学成像的基本知识,使读者进一步了解各类光学成像系统的使用目的和环境。
- 本书用适当篇幅介绍了光学成像领域的最新成就,其中包括:光纤光学成像,衍射光学成像,光层析成像,遥感光学成像,以及近场光学成像的基本原理与技术等。

本书得以出版,要感谢课题组的同仁赖淑蓉老师和张敏博士,以及家人的大力支持和帮助。最后还要感谢清华大学出版社的编辑,感谢他们为本书的出版所做的具体指导和付出的辛勤劳动。

本书内容涉及面广,作者知识有限,书中缺点和错误难免,恳请读者批评指正。

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光学成像发展简史	1
1.1.1 古典光学成像	1
1.1.2 衍射成像	3
1.1.3 近场光学成像	4
1.2 光学成像的基本性质	5
1.3 光学成像的应用	6
1.3.1 信息技术和远距离通信中的光学成像	7
1.3.2 保健、医疗与生命科学中的光学成像	7
1.3.3 光学传感、照明和能源	8
1.3.4 工业制造中的光学成像技术	9
1.4 光学成像技术的发展	9
第 2 章 图像的接收、记录和显示	11
2.1 概述	11
2.2 眼睛的结构和光学成像性质	11
2.2.1 眼睛的结构	11
2.2.2 眼睛的光学性质	13
2.3 眼的视觉物性	15
2.3.1 光觉阈值和光的辨别阈值	15
2.3.2 视觉的空间特性	16
2.3.3 视觉的时间特性	17
2.3.4 视觉的对比特性	18
2.3.5 视觉的照度适应	18
2.3.6 色觉特质	19
2.4 照相乳胶	20
2.4.1 底片的感光特性	20
2.4.2 卤化银乳胶的特性	21
2.5 成像的光电探测与显示	24
2.5.1 概述	24
2.5.2 阴极射线管显示	26
2.5.3 电致发光显示	29
2.5.4 液晶显示	31

2.5.5	激光显示 .....	32
2.5.6	投影显示 .....	33
2.6	彩色图像的接收、显示 .....	35
2.6.1	色度学 .....	35
2.6.2	混色原理 .....	35
2.6.3	色的表示方法 .....	36
2.7	小结 .....	39
	问题 .....	39
<b>第3章</b>	<b>几何光学成像 .....</b>	<b>41</b>
3.1	概述 .....	41
3.2	几何光学基本定律 .....	42
3.2.1	几何光学适应范围 .....	42
3.2.2	光线传播定律 .....	42
3.2.3	成像的基本概念 .....	43
3.2.4	共轴球面光学系统的成像性质 .....	43
3.3	单折射球面的近轴区成像 .....	44
3.4	透镜成像系统 .....	46
3.4.1	理想光学系统的基本特征 .....	46
3.4.2	理想光学系统的物像关系 .....	49
3.4.3	透镜 .....	50
3.5	球面反射镜 .....	52
3.6	平面棱镜系统 .....	53
3.6.1	平面折射成像 .....	53
3.6.2	反射棱镜 .....	54
3.6.3	折射棱镜和光楔 .....	58
3.7	光学系统中的光束限制 .....	60
3.7.1	概述 .....	60
3.7.2	孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳 .....	60
3.7.3	视场光阑、入射窗和出射窗 .....	62
3.8	像差概述 .....	63
3.8.1	轴上点的球差 .....	64
3.8.2	彗差 .....	64
3.8.3	像散和场曲 .....	66
3.8.4	畸变 .....	68
3.8.5	色差 .....	69
3.9	光学仪器的基本原理 .....	70
3.9.1	显微镜 .....	70
3.9.2	望远镜 .....	73



3.10 小结 .....	76
问题 .....	76
<b>第4章 光纤成像 .....</b>	<b>79</b>
4.1 概述 .....	79
4.2 光纤传像束 .....	79
4.3 变折射率光纤(棒)的成像理论 .....	82
4.3.1 折射率分布 .....	82
4.3.2 光纤(棒)中光线的轨迹 .....	83
4.3.3 成像特性 .....	85
4.4 折射率光纤(棒)的像差 .....	87
4.5 变折射率光纤(棒)的制造 .....	91
4.6 变折射率光纤(棒)的应用 .....	91
4.6.1 光纤(棒)用作准直物镜 .....	92
4.6.2 光纤棒用作成像物镜在复印机中的应用 .....	94
4.7 小结 .....	95
问题 .....	96
<b>第5章 衍射成像 .....</b>	<b>97</b>
5.1 概述 .....	97
5.2 衍射的基本理论 .....	97
5.2.1 惠更斯—菲涅耳原理 .....	97
5.2.2 夫琅和菲衍射和菲涅耳衍射 .....	99
5.3 夫琅和菲衍射 .....	101
5.3.1 夫琅和菲单缝衍射 .....	101
5.3.2 夫琅和菲圆孔衍射 .....	104
5.4 夫琅和菲多缝衍射 .....	106
5.4.1 双缝的干涉和衍射 .....	106
5.4.2 多缝的干涉和衍射 .....	108
5.5 平面衍射光栅 .....	111
5.5.1 光栅简介 .....	111
5.5.2 光栅方程 .....	112
5.5.3 光栅的主要性能 .....	113
5.6 菲涅耳衍射 .....	115
5.6.1 圆孔衍射 .....	115
5.6.2 波带片 .....	118
5.7 波前再现成像(全息术) .....	121
5.7.1 概述 .....	121
5.7.2 全息原理 .....	123

5.7.3	物像关系	125
5.7.4	体积全息图	127
5.7.5	傅里叶变换全息图	130
5.7.6	全息术应用	133
5.7.7	光纤在全息记录系统中的应用	136
5.8	傅里叶光学	137
5.8.1	概述	137
5.8.2	薄透镜的傅里叶变换性质	138
5.8.3	光学傅里叶变换	139
5.9	二元光学	141
5.9.1	概述	141
5.9.2	二元光学的特点	142
5.9.3	二元光学器件的制作	143
5.9.4	二元光学的应用	143
5.9.5	菲涅耳透镜阵列	147
5.9.6	产生超分辨率的异型菲涅耳透镜	147
5.10	小结	148
	问题	149
<b>第 6 章</b>	<b>扫描成像</b>	<b>151</b>
6.1	概述	151
6.2	扫描成像的取样	151
6.3	扫描成像的分辨率和焦深	153
6.4	扫描成像系统的取样间隔	155
6.5	扫描成像举例	158
6.6	小结	159
	问题	159
<b>第 7 章</b>	<b>遥感成像</b>	<b>160</b>
7.1	概述	160
7.2	光电遥感仪	163
7.3	红外宽波段遥感的应用	165
7.3.1	红外遥感在气象方面的应用	165
7.3.2	红外遥感在环保方面的应用	166
7.3.3	遥感在农业方面的应用	167
7.3.4	红外遥感在地学方面的应用	167
7.4	高光谱遥感的分析技术	168
7.4.1	高光谱遥感的特点	169
7.4.2	高光谱遥感的主要分析技术	170



7.5	高光谱遥感在植被研究中的应用 .....	171
7.6	小结 .....	173
	问题 .....	173
<b>第 8 章</b>	<b>高速摄影 .....</b>	<b>174</b>
8.1	概述 .....	174
8.2	转镜式高速相机的光学特性 .....	175
8.2.1	光学原理 .....	175
8.2.2	扫描速度 $V_s$ .....	175
8.2.3	时间分辨本领 .....	176
8.2.4	相对孔径 .....	177
8.2.5	空间分辨率 .....	177
8.3	转镜式高速分幅相机 .....	178
8.3.1	工作原理 .....	178
8.3.2	光快门的作用原理 .....	178
8.4	高速变像管相机 .....	179
8.5	间接成像式高速摄影 .....	180
8.5.1	通过光强的变化记录高速过程 .....	180
8.5.2	通过相位变化记录高速过程 .....	182
8.5.3	通过偏振态的变化记录高速过程 .....	184
8.5.4	通过频率(波长)的变化记录高速过程 .....	185
8.5.5	利用受抑全反射光测量高速过程 .....	189
8.6	小结 .....	189
	问题 .....	190
<b>第 9 章</b>	<b>软 X 射线和极紫外光显微成像 .....</b>	<b>191</b>
9.1	概述 .....	191
9.2	软 X 射线和极紫外光源 .....	193
9.2.1	同步辐射软 X 射线源 .....	193
9.2.2	X 射线激光 .....	193
9.2.3	电子束靶低能 X 射线源 .....	194
9.3	软 X 射线和极紫外光的传输 .....	194
9.3.1	分界面上的反射、折射和掠射 .....	194
9.3.2	掠射法 .....	194
9.3.3	空芯波导法 .....	196
9.3.4	波带片法 .....	196
9.4	软 X 射线显微成像方法 .....	201
9.4.1	接触式 X 射线显微术 .....	201
9.4.2	投影式 X 射线显微术 .....	203

9.4.3	波带片全场成像 X 射线显微术 .....	203
9.4.4	扫描 X 射线显微术 .....	203
9.5	软 X 射线图像记录技术 .....	204
9.6	极短波的应用 .....	204
9.6.1	极紫外与 X 射线光刻 .....	204
9.6.2	极短波在生命科学中的应用 .....	204
9.6.3	极短波在物理学中的应用 .....	205
9.6.4	极短波全息术 .....	206
9.7	小结 .....	206
	问题 .....	207
<b>第 10 章</b>	<b>计算机层析成像技术 .....</b>	<b>208</b>
10.1	概述 .....	208
10.2	计算机层析成像的原理 .....	208
10.2.1	概述 .....	208
10.2.2	投影数据和拉冬变换 .....	209
10.2.3	投影的中心频谱定理 .....	212
10.2.4	回投影、取和及模糊图像的重现 .....	213
10.3	医用 X 射线 CT 成像技术 .....	214
10.4	核辐射 CT 成像技术 .....	215
10.4.1	引言 .....	215
10.4.2	正电子发射 CT 成像 .....	216
10.4.3	单光子发射 CT 成像 .....	219
10.5	工业 CT 成像技术 .....	219
10.5.1	工业 CT 成像的原理 .....	219
10.5.2	工业 CT 成像系统的组成 .....	220
10.5.3	工业 CT 成像系统的主要性能 .....	221
10.5.4	工业 CT 成像的应用 .....	221
10.6	中子成像技术 .....	222
10.7	光学层析成像 .....	223
10.7.1	概述 .....	223
10.7.2	光学 CT 发展现状 .....	224
10.7.3	光学相干层析成像技术 .....	227
10.7.4	光弥散层析成像技术 .....	229
10.7.5	光过程层析成像 .....	229
10.8	小结 .....	233
	问题 .....	233

第 11 章 近场光学成像 .....	234
11.1 概述 .....	234
11.2 近场光学显微镜的基本原理 .....	235
11.2.1 光学显微镜的分辨本领与瑞利判据 .....	235
11.2.2 突破分辨率衍射极限的可能性 .....	236
11.2.3 突破分辨率衍射极限的途径 .....	238
11.2.4 全反射中的消逝场 .....	239
11.2.5 光栅衍射场 .....	240
11.2.6 消逝场的特点 .....	243
11.2.7 近场探测的基本原理 .....	243
11.3 近场显微镜简介 .....	244
11.3.1 基本结构 .....	244
11.3.2 光学探针 .....	246
11.3.3 探针与样品距离的测控 .....	247
11.4 近场光学显微镜的应用 .....	250
11.4.1 超分辨成像 .....	250
11.4.2 近场光谱成像 .....	251
11.4.3 近场光刻/光写和近场光存储 .....	253
11.5 小结 .....	254
问题 .....	254
第 12 章 综合孔径成像 .....	255
12.1 前言 .....	255
12.2 综合孔径成像的基本原理 .....	255
12.3 干涉法孔径综合 .....	256
12.3.1 干涉法孔径综合原理 .....	256
12.3.2 迈克尔逊星体干涉仪 .....	259
12.4 组合孔径法孔径综合 .....	260
12.4.1 概述 .....	260
12.4.2 组合望远镜 .....	260
12.4.3 部分孔径成像 .....	261
12.5 相干编码法孔径综合——综合孔径雷达 .....	261
12.5.1 线性调频信号和透镜聚焦 .....	261
12.5.2 多普勒孔径结合 .....	264
12.6 小结 .....	265
问题 .....	266

<b>第 13 章 编码孔成像</b> .....	267
13.1 概述 .....	267
13.2 提高信噪比的“称重法” .....	267
13.3 阿达玛(Hadamard)编码 .....	269
13.4 阿达玛编码在光谱学和成像技术中的应用 .....	270
13.4.1 阿达玛编码光谱仪 .....	270
13.4.2 阿达玛变换成像 .....	271
13.5 小结 .....	272
问题 .....	272
<b>第 14 章 图像处理</b> .....	273
14.1 概述 .....	273
14.2 空间滤波 .....	274
14.2.1 概述 .....	274
14.2.2 光学频谱分析系统 .....	275
14.2.3 空间频率滤波 .....	275
14.2.4 空间振幅滤波器 .....	276
14.3 空间相位滤波器 .....	280
14.4 空间全息滤波器 .....	281
14.5 自适应校正成像 .....	282
14.5.1 概述 .....	282
14.5.2 波前传感 .....	283
14.5.3 波前校正器 .....	285
14.5.4 波前控制器 .....	285
14.5.5 自适应光学的应用 .....	285
14.6 光学成像系统的频谱分析 .....	289
14.6.1 概述 .....	289
14.6.2 成像系统的一般分析 .....	291
14.6.3 衍射受限的相干成像系统的频率响应 .....	293
14.6.4 衍射受限的非相干成像系统的频率响应 .....	295
14.7 小结 .....	299
问题 .....	300
<b>参考文献</b> .....	301

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 光学成像发展简史

光学成像和光学这门学科具有同样悠久的历史。实际上,光学作为一门学科的发展是起源于光学成像的。光学成像的发展大致可分为三个阶段:古典光学成像(即直接光学成像)、衍射光学成像(即间接光学成像)和近场光学成像(属扫描光学成像)。下面分别简要介绍<sup>[1~3]</sup>。

### 1.1.1 古典光学成像

古典光学成像是基于几何光学(或称光线光学)的成像方式,是直接成像的方法。所以,几何光学成像方式的研究,起源于几何光学基本规律——光的反射和折射定律的研究,随之出现利用凹面反射成像的铜镜。

人类对光的研究,最初主要是试图回答像“人为什么能看见周围物体”这一类问题。有些书以古希腊欧几里德(Euclid,公元前 385—前 323 年)对这一问题的回答作为世界光学知识的最早记录。但是在比欧几里德的书早约百年的我国《墨经》(先秦时代,约在公元前 470—前 400 年)上,对光的几何性质已有了较完全的记载。

《墨经》中有八条是关于光学成像的,第一条是叙述影的定义与生成;第二条说明光与影的关系;第三条则是光的直线行进,并且用针孔成像的实验来说明它;第四条说明光的反射性能;第五条由光和光源的关系而定影的大小;其余三条分别叙述了平面镜、凹球面镜和凸球面镜中物和像的关系。

《墨经》的梁本第二十条,经云“景倒,在午有端。”经说云:“景,光之人,煦若射;下者之人也高,高者之人也下。足蔽下光,故成景于上,首蔽上光,故成景于下。”这段文字是以描写一个针孔成像实验来说明光的直线行进。用现代的语言则是:“光向人照去,好像射箭一样,从下面照去的到高处去了,从高处照去的到下面去了。足遮住了下面的光线,所以成影在上面;头遮住了上面的光,所以成影在下面。”午,是一纵一横相交之点,可作针孔照相匣上的小孔讲;而端,就是光线经小孔所成的光束。所以“景倒,在午有端”,就是自人发出的光线交于针孔而成光束,足蔽下光成景于上,首蔽上光成景于下,故得头在下,足在上的倒像。

事实上,从记载我国周代的工业技术和制度的《考工记》也可得知,当时已经会用凹面镜取火,称之为燧。对制造镜所用材料的成分也作了记载:“金锡半谓之鉴燧之齐。”金就是指铜,齐就是合金,鉴是照人用的镜子。可见,那时鉴燧两物都是用铜锡各半的合金制成的。

后来,第 9 世纪,我国宋代的沈括在《梦溪笔谈》一书中对凹面镜和凸面镜的成像以及凹面镜焦点都作了相当详细的记载,如“古人铸鉴,鉴大则平,鉴小则凸,凡鉴洼则照人面大,凸

则人面小,小鉴则不能全观人面,故令微凸,收人面令小,则鉴虽小而能纳人面,仍复量鉴之大小增损高下,常令人面与鉴大小相若。”对凹面镜的焦点写道:“阳燧面洼,向日照之,光皆聚向内,离镜一、二寸,光聚为一点,大如麻菽,著物即火发。”从这段文字可以看到,沈括所说的凹面镜的曲率半径应在二寸到四寸之间,而且镜的球面和光滑程度应当是相当好的,因为这个镜的焦点只有芝麻粒儿那么大,把东西放在焦点就着火!而英国人在此后400年(即13世纪),才相传R.培根(Bacon)花3年工夫在他53岁那年磨成一个凹面镜,用它在太阳光下取火。可见,我国古代在光学上的贡献并不逊于世界上任何其他民族。

至于成像用的透镜,则是公元1100年阿拉伯人阿尔·海兹恩(Al-Hazen)首先发明的,公元1590年,琼斯(Jonsen)和李普塞(Lippershey)发明了第一架望远镜。17世纪初,冯特纳(Fontana)发明了第一架显微镜。但是,一直到17世纪上半叶,才由斯涅耳(Snell)和笛卡儿(Descarte)将对于光的反射和折射的观察结果,归结为今天所用的反射定律和折射定律。约在他们的同时,费马(Fermat)又得到了确定光在介质中传播所走路径的光程极值的原理,这个原理可以包括反射定律和折射定律。所以,经过漫长的时期,到17世纪上半叶,人们才研究清楚光的几何性质。而其余的一切,例如关于视觉中的两个基本特征——亮度和颜色的观念,仍很模糊。

到17世纪后半叶,牛顿(Isaac Newton)和惠更斯(Christian Huggens)等对光的研究使光学跨上了发展的新台阶。

牛顿的成就是发现了太阳光谱:白光是由多种颜色的光组成。惠更斯的成就则是发现了光的波动性,建立了光的干涉、衍射现象的理论基础——光的波动说。

惠更斯是光的微粒说的反对者,他创立了波动说。他在1690年于《论光》一书中写道:“光同声一样,是以球形波面传播的,这种波和把石子投在平静的水面上时所看到的波相似。”他从声现象和光现象的许多类似出发,认为必须把光振动看作是在一种特殊的介质——“以太”中传播的弹性脉动,而这种特殊的介质充满宇宙的全部空间。然而,惠更斯关于光波的概念还很不完全,例如,他始终没有提到光波在空间上的周期性。所以惠更斯的波动说只是相当粗略地指出光的波动性,这个学说最有意义的内容是寻求光振动的传播方向的惠更斯原理:光振动所达到的每一点都可视为次波的振动中心,次波的包络面即为传播着的波的波阵面(波前)。

麦克斯韦(C. Maxwell)创立了光的电磁场理论。1860年,麦克斯韦关于电场和磁场的理论研究指出,电场和磁场的改变不能局限在空间的某一部分,而是以等于电流的电磁单位与静电单位的比值的速度传播着;光的传播就是这样的一种电磁现象。这个结论在1892年被赫兹(Hertz)的实验证实。按照麦克斯韦的理论,若以 $v$ 代表光在介电常数为 $\epsilon$ 和导磁系数为 $\mu$ 的介质中的速度,则有

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}$$

式中, $c$ 代表光在真空中的速度。因为 $\frac{c}{v} = n$ , $n$ 为介质的折射率,所以

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

上式给出了物质的光学常数 $n$ 同电学常数 $\epsilon$ 和磁学常数 $\mu$ 之间的关系。在认识光的本性方面,麦克斯韦电磁理论较之弹性固体理论向前迈进了一大步:麦克斯韦电磁理论说明了光



波的本质是电磁波,而不是弹性波。

至此,基于几何光学和光的经典电磁理论而形成的光学仪器设计理论已趋完善,并由此构成了各种光学仪器:显微镜、望远镜、照相机、投影仪以及其他一些专用光学仪器。由于光学材料品种的多样化,光学元件加工技术的改进,以及精密机械加工技术的进步,使得上述光学仪器从成像角度看,已达到较完善的地步,分辨率接近衍射分辨的极限。所以,从20世纪初到20世纪60年代,基于几何光学原理构成的光学仪器已无本质改进,基于几何光学和光的经典电磁理论而形成的光学仪器的发展似乎已到尽头。

20世纪60年代,由于激光这一崭新光源的出现,以及随之出现的光电子技术、光纤技术,以及大规模半导体集成技术和计算机技术的飞速发展,使光学仪器有了本质的变化,主要表现在:

① **功能多样化**。例如,利用 CCD 摄像和计算机技术,使光学仪器成的像可在计算机上显示,大大方便了对像的实时观察和处理,因而极大地拓宽了其使用范围。医用外科显微手术用光学显微镜就是一例。

② **结构简单化**。由于计算机和光学设计、光学加工结合,使非球面的设计、加工和应用成为现实。非球面光学元件的使用,不仅简化了光学仪器的结构,也提高了光学仪器成像的像质。

③ **使用智能化**。由于计算机技术、自动控制技术、光电子技术等结合,使光学仪器成为具有多功能和智能化的先进仪器。

虽然如此,光学仪器成像的原理依旧,仍然是几何光学。上述功能只是锦上添花,并无本质变化。

### 1.1.2 衍射成像

20世纪60年代初,高相干性的新型光源——激光诞生后,对光学成像的贡献是,光学成像技术由简单的直接成像前进到成像技术的一个新阶段——间接成像,即衍射成像,衍射成像和几何光学成像方式的本质差别是,几何光学成像仅记录了物光波(由物体发出的光波)的振幅,而丢失了物光波的相位信息。衍射成像则记录了物光波的全部信息:振幅和相位。所以,衍射成像的全息成像术,又称为波前再现成像,其特点是可再现真正的立体图像。但其成像过程比直接成像复杂,对成像用光源也有严格要求,记录时它要求相干性高的光源照明被拍摄的物体(详见第5章)。

全息术是利用光的干涉和衍射原理,将物体散射的特定波长的单色光波以干涉条纹的形式记录下来,并在一定条件下以光栅衍射的原理使其再现,形成和原物体逼真的三维像。由于它记录了被拍摄物体的全部信息(振幅和位相),因此称为全息术或全息照相。

全息术是英国科学家丹尼斯·加伯(Dennis Gabor)在1947年为提高电子显微镜的分辨率,在布喇格(Bragg)和泽尼克(Zernike)工作的基础上提出的。由于需要高度相干性和高强度的光源,直到1960年激光出现,以及1962年利思(Leith)和厄帕特尼克斯(Upatnieks)提出离轴全息图以后,全息术的研究才进入一个具有应用价值的新阶段。此后相继出现了多种全息方法,开辟了全息应用的新领域,使全息术成为光学和光学成像的一个重要分支。

光全息术的发展到现在可分为以下三个时期:

(1) **萌芽时期**。此时全息术是用水银灯记录同轴全息图,这是第一代的全息术。其主要问题是再现的原始像和共轭像不能分离,而且没有好的相干光源(结果是分辨率差,衍射效率低)。

(2) **发展时期**。在这一阶段,人们为全息术建立了较完善的理论基础,发展了可能的应用,研究了新型全息记录材料。在可能的应用方面做了大量的实验,并取得丰硕的成果。相应地,全息记录材料方面也得到发展,开始使用高分辨率卤化银乳胶。后来,实时记录材料——光导热塑料和相位记录材料重铬酸盐明胶被相继发现,科学家们又开展了光聚合材料和光致抗蚀剂的研究,这是第二代的全息术。第二代全息术的特点是用激光记录,激光再现。利思和厄帕特尼克斯提出的离轴全息图,可把原始像和共轭像在空间分离。

(3) **应用时期**。这时全息术进入第三代,其特点是出现了激光记录白光再现的全息术,并且全息术被全面推广、应用。主要有反射全息、像面全息、彩虹全息及合成全息等,使全息术在显示方面展现其突出的优越性。白光再现全息术的特点是能够在白昼自然环境中,或者在一般白光照明下观察到三维再现的全息图像。反射全息图,特别是真彩色反射全息图已成为一种高贵的艺术品,在科学技术上也有许多有价值的应用。浮雕彩虹全息图的研制成功,发展了全息图模压大批量复制技术,现已形成全息印刷产业。此外,全息术在无损检测方面也获得全面推广、应用,例如全息干涉计量、全息测温、散斑全息等。

### 1.1.3 近场光学成像

从光学显微镜诞生后至今的 500 年间,人类为提高显微镜的分辨率进行了不懈的努力。但是,自 300 年前发明复合透镜,从而使显微镜分辨率有很大提高后,光学显微镜的分辨率就基本固定。其原因是显微物镜存在一个由衍射效应引起的“不可逾越”的分辨率极限。由于对被观察物体不造成损伤是光学显微镜的一大优点,因此,在非光学显微镜(扫描电子显微镜、扫描隧道显微镜和场离子显微镜)的分辨率已达到原子级(0.1nm)的水平时,提高光学显微镜的分辨率仍有重大的意义。近场扫描显微镜的构想突破了上述“不可逾越”的分辨率极限(详见第 11 章)。

近场显微镜的构想最早是由英国的申奇(E. Hsnyge)提出的,他多次将自己的构想和大科学家爱因斯坦在书信中讨论,在爱因斯坦的鼓励下,1928 年他发表了论文“把显微镜分辨率扩展到超大型显微区的建议”。申奇建议的要点如下:

(1) 在不透明的平板或薄膜上,制备出近似为 10nm 的小孔,放在距离一个平整度达几纳米的生物样品切片正下方几纳米的地方;

(2) 入射光通过上述平板小孔照明样品,透过样品的光被显微镜聚焦到光电池上;

(3) 保持入射光强度不变,通过以 10nm 的步距在两个方向上移动样品的方法,使入射光点沿样品平面以网格状扫描样品。由于样品各点的透过率不同,各点在光电池上将产生不同的光电流,结果获得明暗对比不同的图形,这就是样品被扫描部分的图像。

特别值得指出的是,申奇在文章中专门指出新型显微镜在技术上的关键问题是,小孔和生物切片表面要尽可能靠近。此外,申奇在论文中指出了实现以上构想的技术难点:

(1) 光源必须非常强;

(2) 要求在垂直切片方向上,样品切片和平板小孔之间的距离至少能做到纳米级的微

小调节；在沿切片平面方向，实现 10nm 量级的移动；

(3) 制备出大小为 10nm 量级的小孔。

申奇认为，他构想的新型显微镜的分辨极限可达到 0.01nm，甚至更好。但是由于实现近场显微镜的构想以达到突破衍射极限的目的尚需克服上述三大困难，即强光源的获得、极小孔的制备和极小间距的控制，因此，近场显微镜的发展并不尽如人意。下面是近场显微镜发展过程中的几个重要成果。

(1) 20 世纪 60 年代初，激光器的发明解决了构成近场显微镜的第一个难题：强光源的获得。

(2) 20 世纪 80 年代初，扫描隧道显微镜的发明，为申奇提出的第二个困难，即纳米间距和纳米步距的控制铺平了道路。

(3) 20 世纪 80 年代初，对于申奇提出的第三个困难：纳米量级的小孔制造，也有人提出了解决办法。1984 年，在扫描隧道显微镜发明两年后，IBM 苏黎世研究实验室的 D. W. Pohl 等，在实心石英细丝端面制备出纳米尺度的透光小孔，解决了纳米级小孔制造的难题，并且研制出称作“光学听诊器”的扫描近场光学显微镜 (scanning near-field optical microscope, SNOM)。它的分辨极限达到了  $1/20$  波长，首次实现了可见光波段由衍射效应导致的显微镜分辨极限的突破。由于到目前为止，突破分辨率衍射极限的光学显微镜必须采用扫描技术，所以扫描近场光学显微镜 (SNOM) 或近场扫描光学显微镜 (NSOM) 的中文名词，在有些书中也简略地采用“近场光学显微镜”，“扫描”二字被略去。

(4) 20 世纪 90 年代初，出现了实用化的近场光学显微镜，其主要成就是，用切变力的变化控制纳米级的间距和步距，用光纤端面制备纳米级小孔，这是贝尔实验室 E. Bieizg 等人的成果。1991 年，他们发表了对近场扫描光学显微镜改进工作的论文。E. Bieizg 等人的第一个重大技术改进是用单模光纤代替玻璃毛细管，研制成一种新的探针；第二个重大技术改进是采用激光探测针尖和样品间的切变力变化，并利用该切变力变化进行反馈控制的方法，方便地解决了监测和控制针尖至样品表面之间距离为纳米量级的问题。上述两项技术改进，为近场光学显微镜走向实用化扫清了道路，美国的 TopoMetrix 公司很快在 1993 年 10 月推出了商品名叫“Aurora”的近场光学显微镜，观察到了直径为 18nm 的棒状烟草病毒的像。

现在，近场光学显微镜的改进工作仍在继续。这些改进主要集中在探针的设计制造和探针与样品间距离的测控两个问题上。另外，使近场光学显微镜应用于成像以外的领域，也是人们不断探索的内容。

## 1.2 光学成像的基本性质

光学成像是通过一定的光学成像系统，将被观察对象转化为可目视观察的图像。图 1-2-1 所示是光学成像过程的框图。图中，光学成像系统不仅包括系统的光学部分，还包括相应的机械和电子单元，用于系统的调节、控制，信息的传输、记录、处理以及图像的输出等。

光学成像的方法有多种，可从不同角度分类，以适应不同的需要。例如，可按成像方式、成像原理、成像的时空关系、成像用特征参量等分类。下面对此作简要说明。