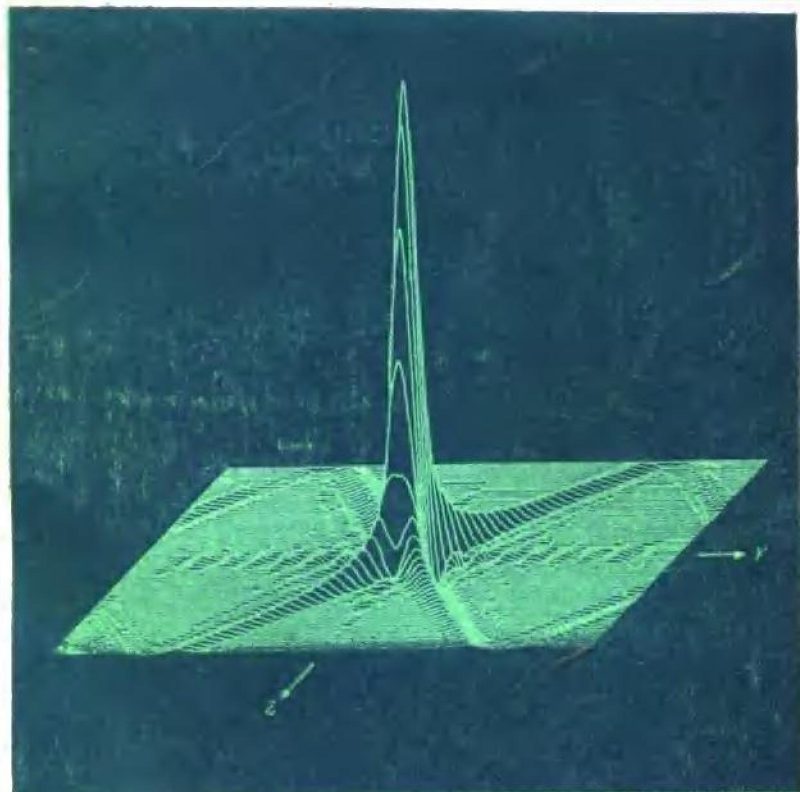


实验物理学丛书

成像光学

王之江 伍树东 著



科学出版社

实验物理学丛书

成 像 光 学

王之江 伍树东 著

科 学 出 版 社

1 9 9 1

内 容 简 介

成像是光学最重要的应用领域。绝大部分光学仪器都以光学成像为基础。近代光学的发展开拓了多种成像的新方法、新领域。本书试图对已有的理论和方法作一个总结。首先讨论几何成像的可能性及其限制、几何成像的衍射理论和对成像的影响。然后讨论扫描成像,由于激光的出现,这一领域有很大发展。接着阐述衍射成像,随着激光全息术的发展,它已受到很大重视。全息术是由物体的衍射谱作重结构而得到所需的像,这是收集物体的信息然后重结构成像的开端。编码孔成像,雷达综合孔径成像,X光断层成像,超声全息成像等等,都属这个范畴。本书对此都进行了讨论。

本书可作为光学仪器和光学专业的大学生和研究生的教材或参考书,也可供光学领域的工作者参考。

实验物理学丛书

成 像 光 学

王之江 伍树东 著

责任编辑 陈菊华

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年9月第一版 开本:850×1168 1/32
1991年9月第一次印刷 印张:13 3/4
印数:平 001—1 000 插页:精 2
精 001—450 字数:394 000

ISBN 7-03-002280-7/O·428 (平)

ISBN 7-03-002281-5/O·429 (精)

定价: 平 装 16.40 元
布面精装 18.60 元

科技新书目: 245—平 085 精 086

序 言

实验是物理学发展的基础,又是检验物理理论的唯一标准.回顾物理学发展的历史,正是实验技术的发展,推动着整个物理学向前发展.因此,实验是物理学和一切科学技术发展的基础.

为了适应我国科技事业发展的需要,强调实验物理学的重要性,并总结我国物理学工作者在实验工作中的创新和实践经验,我们特编辑出版《实验物理学丛书》.

本丛书的编辑方针是: 1. 密切联系当前科研、教学、生产的实际需要,介绍各种物理实验的基本原理、技术、设备及其在各方面的应用. 2. 反映国内外最新的实验水平和发展动向,并注意实用性. 3. 以科技工作者和高等院校师生为对象,坚持理论联系实际,贯彻百家争鸣的方针,力求使丛书具有我国的特色和风格.

我国科技事业的发展已进入一个新的时期,实现科学技术现代化是我国广大科技工作者肩负的光荣而艰巨的任务.我们诚恳地希望广大物理学工作者发挥为社会主义事业著述的积极性,不断总结实践经验,总结研究成果,积极支持丛书的出版工作,共同为出好本丛书而努力.

《实验物理学丛书》编委会

《实验物理学丛书》编委会

主 编	钱临照				
副主编	王淦昌	王大珩	柯 俊	洪朝生	管惟炎
编 委	王之江	王业宁	王守觉	王华馥	王祝翔
	许顺生	华中一	荀清泉	何寿安	吴自勤
	张志三	汤定元	杨 楨	杨顺华	项志遵
	姜承烈	徐其昌	徐叙瑗	章 综	郭可信
	樊祖同	黄兰友	梅镇岳	程晓伍	薛鸣球
	魏荣爵				

前 言

人从自然界获得的绝大部分信息是通过图像形式得到的。虽然裸眼能直接看到物体，但可看到的范围是很有限的。随着人们对自然认识的加深和科学技术的发展，要求观察的对象越来越广。从原子世界到远距离星系，从地球外貌到地层结构，从晶体到生物分子，从反射物体、透射物体到位相物体(见 § 4.6)等等。从制造简单的助视仪器开始，人们已发展了不同的成像技术。特别是近年来随着电子、激光、计算机等技术的发展，出现了很多现代获取图像信息的方法。现在已不只局限于光学成像，从无线电波到 γ 射线的整个电磁波段、放射性粒子、电子、声波等都被用来作为不同观察对象的成像媒介。成像技术被广泛应用于各个领域。

当今图像科学已成为一重要的科学分支。它包括了图像的形成、获取、传输、存储、处理、分析、识别，成像系统的设计、分析、评价，新的成像方法的寻找等方面。现代成像理论实际上是光学成像理论与电信理论相结合的产物。图像科学已成为现代光学的重要组成部分。美国光学学会会刊(*J. Opt. Soc. Am.*)有两分册，其一叫《光学和成像科学》就是为了适应这种发展的需要而设立的。不同领域获取图像信息的方法很不相同，成像理论把它们有机地联系起来，互相借鉴、互相促进。成像理论不再只局限于光学领域，但又是以光学成像为基础。这也是本书取名为《成像光学》的原因。

本书的目的是使读者对现代成像理论，对获取图像信息的不同原理、优缺点以及应用有一概括的了解。任何读者不太可能工作在书中所涉及的各项方面，然而通过对成像科学的整个领域的了解，可从不同方面得到启发，促进现有成像方法的改进和对获取图像信息的新途径的探索。本书是作者在中国科学技术大学物理系

和浙江大学光学仪器系讲授研究生课程的基础上整理而成。内容所涉及的面很广，事实上几乎每章都可以用专著论述，本书不可能对所有成像问题作详细讨论。为了限制篇幅，书中有些公式的推导过程比较简略，内容重点放在概念、原理和方法的阐述上。

本书的头两章分别介绍图像、成像系统的基本分析方法和图像接收、显示，是本书的基础性知识材料。第三、四章分别讨论几何光学成像及其衍射理论。从第五章到第九章讨论不同的间接成像技术，其中包括衍射成像、扫描成像、综合孔径成像、层析成像以及编码孔成像等。这也许可以反映间接成像技术是目前研究成像技术的主流。最后一章讨论了图像复原的一般方法。

作者对在书稿的整理中给予帮助的王书泽、林跃、齐坚、王洪欣等同志表示感谢。

王之江 伍树东

符 号 说 明

\mathbf{r} 二维或三维坐标矢量

\mathbf{f} 二维或三维空间频率矢量

$\|\mathbf{f}\|, \|\mathbf{r}\|$ 矢量 \mathbf{f}, \mathbf{r} 的绝对值

\mathbf{r} 的分量为 (x, y, z)

\mathbf{f} 的分量为 (u, v, w)

$\int d\mathbf{r}$ 二维或三维积分. 不注明积分限, 均为全域积分

$$FT_{x,u} = \int \exp(-j2\pi ux) dx$$

$$FT_{\substack{x,u \\ y,v}} = \iint \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy$$

$$FT_{\mathbf{r},\mathbf{f}} = \int \exp(-j2\pi \mathbf{f} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

$$FT_{x,u}^{-1} = \int \exp(j2\pi ux) du$$

$$FT_{\substack{x,u \\ y,v}}^{-1} = \iint \exp[j2\pi(ux + vy)] dudv$$

$$FT_{\mathbf{r},\mathbf{f}}^{-1} = \int \exp(j2\pi \mathbf{f} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{f}$$

目 录

序言	i
前言	iii
符号说明	xiii
第一章 图像、成像系统和信息	1
§ 1.1 图像的基本性质	1
1.1.1 图像的基本描述	1
1.1.2 图像的统计描述	12
§ 1.2 成像系统的基本性质	21
1.2.1 成像过程和成像方法	21
1.2.2 线性系统和平移不变性	23
1.2.3 点扩散函数	24
1.2.4 线扩散函数和边扩散函数	25
1.2.5 系统的频域分析和传递函数	28
1.2.6 系统的等效带宽、分辨率和空间带宽积	30
1.2.7 串级线性系统	31
1.2.8 系统对随机信号的作用	32
1.2.9 线性滤波	34
§ 1.3 图像的信息	40
1.3.1 信息的量度	41
1.3.2 信息通道容量	43
1.3.3 图像的信息和冗余度	46
1.3.4 图像的编码	47
思考题	49
参考文献	50
第二章 图像的接收和显示	51
§ 2.1 视觉	51
2.1.1 眼睛的光学性质	51

2.1.2 视觉现象	53
§ 2.2 照相乳胶	59
2.2.1 感光特性	59
2.2.2 分辨率	62
2.2.3 颗粒噪音	63
§ 2.3 成像光电接收器	67
2.3.1 单接收器	67
2.3.2 成像管	69
2.3.3 像增强器和光子计数成像	71
2.3.4 安格相机	73
§ 2.4 彩色和立体图像的接收、显示	73
2.4.1 色度学	73
2.4.2 彩色图像的记录和显示	80
2.4.3 立体图像的显示	84
思考题	89
参考文献	89
第三章 几何成像	90
§ 3.1 几何光学的基本定律	90
3.1.1 几何光学定律的适用范围及程函方程	90
3.1.2 光线方程及费马原理	92
3.1.3 马勒斯定理	94
3.1.4 拉格朗日不变量	95
§ 3.2 高斯光学	96
3.2.1 物像空间为均匀媒质的成像公式	96
3.2.2 轴对称梯度“光纤”	98
3.2.3 电子光学	99
3.2.4 几何光学的矩阵方法	100
§ 3.3 光管和光栏	103
3.3.1 光管和光栏	103
3.3.2 拉格朗日不变量与能量、信息量的关系	104
§ 3.4 像差和对称性	105
3.4.1 波像差和赛德耳系数	105

3.4.2	初级像差的几何表示	107
3.4.3	光阑移动引起像差系数变化	109
3.4.4	光阑像差与物面像差的关系	110
3.4.5	物面移动引起像差系数变化	111
§ 3.5	光路计算及初级像差系数	112
3.5.1	球面光路计算和球差	112
3.5.2	光阑在球心时的初级像差及齐明条件	114
3.5.3	非球面光路计算及像差	115
§ 3.6	校正像差的可能性及光学设计方法	118
3.6.1	阿贝正弦条件	118
3.6.2	轴向倍率和赫谢耳条件	119
3.6.3	光学设计方法	121
§ 3.7	实用光学系统简介	122
3.7.1	望远镜系统	122
3.7.2	转像系统	122
3.7.3	双胶合透镜的设计考虑	122
3.7.4	显微物镜	123
3.7.5	照相物镜	124
3.7.6	聚光系统	124
	思考题	125
	参考文献	126
第四章	几何成像的衍射理论	127
§ 4.1	标量衍射理论	128
4.1.1	惠更斯原理	128
4.1.2	光波的平面波角谱	129
4.1.3	光波的自由空间传播作为线性系统	131
4.1.4	孔径的衍射作用	133
4.1.5	塔耳波特自成像效应	134
4.1.6	焦点附近的场	135
4.1.7	高斯光束的传播	138
§ 4.2	多次衍射	141
4.2.1	多次衍射问题的简化	142

4.2.2	光学谐振腔中的多次衍射	143
4.2.3	扁球函数	147
§ 4.3	光学成像系统的频谱分析	151
4.3.1	点像的衍射和相干传递函数	151
4.3.2	非相干照明成像系统	155
4.3.3	相干照明成像系统	157
§ 4.4	部分相干成像	161
4.4.1	互强度和复相干度	161
4.4.2	范·西特-泽尼克定理	162
4.4.3	互强度的传递	164
4.4.4	互强度传递的双重谱分析	165
4.4.5	部分相干成像的双重谱分析	166
4.4.6	对弱物体的线性近似	169
4.4.7	照明对显微镜分辨率的影响	171
4.4.8	用模糊函数和维格纳分布函数描述部分相干成像 ...	173
§ 4.5	变迹术	180
4.5.1	等效带宽和测不准关系	181
4.5.2	最大区域能量	182
4.5.3	最小等效宽度	183
4.5.4	超衍射极限分辨变迹术	184
4.5.5	焦深的延长	186
§ 4.6	相位物体的成像	188
4.6.1	泽尼克相衬法	189
4.6.2	小孔衍射干涉法	190
4.6.3	刀口法	193
§ 4.7	光学成像系统的评价	195
4.7.1	点扩散函数	196
4.7.2	频率传递函数	197
4.7.3	部分相干成像系统的评价	201
4.7.4	模糊函数与离焦 OTF	204
4.7.5	信息容量	205
§ 4.8	惠更斯衍射理论的局限性	206

思考题·····	208
参考文献·····	209
第五章 衍射成像 ·····	211
§ 5.1 菲涅耳环带片·····	211
§ 5.2 全息成像·····	218
5.2.1 全息图是物体的编码记录·····	218
5.2.2 全息图的记录方式·····	219
5.2.3 全息图的观察·····	221
5.2.4 全息图的信息容量·····	221
§ 5.3 全息术的应用·····	223
5.3.1 全息干涉计量·····	223
5.3.2 全息元件·····	224
5.3.3 白光显示技术·····	225
5.3.4 全息显微术·····	228
5.3.5 X光全息·····	228
5.3.6 电子全息·····	229
5.3.7 微波全息和超声全息·····	230
§ 5.4 X射线衍射和晶体结构分析·····	230
5.4.1 晶体对X射线的衍射·····	231
5.4.2 晶体的衍射和光学的模拟衍射·····	233
5.4.3 帕特孙方法·····	234
思考题·····	235
参考文献·····	236
第六章 扫描成像 ·····	237
§ 6.1 扫描成像的分辨率和焦深·····	237
§ 6.2 扫描成像系统和光学传递函数·····	242
6.2.1 扫描成像系统的等晕条件·····	242
6.2.2 OTF概念的扩展·····	247
6.2.3 谱交叠的量度·····	248
§ 6.3 扫描成像的例子·····	249
参考文献·····	252
第七章 综合孔径成像 ·····	254

§ 7.1 干涉法孔径综合	255
7.1.1 复相干度和物谱	255
7.1.2 迈克耳孙星体干涉仪	258
7.1.3 强度干涉仪	260
7.1.4 无线电干涉仪	262
§ 7.2 组合孔径法综合	264
7.2.1 组合望远镜	264
7.2.2 无线电天线列阵	267
7.2.3 部分孔径成像	272
7.2.4 相关接收列阵	273
§ 7.3 综合孔径雷达	275
7.3.1 线性调频信号和透镜聚焦	275
7.3.2 线性调频雷达	279
7.3.3 多普勒孔径综合	282
7.3.4 综合孔径雷达	284
7.3.5 旋转物体的综合成像	290
思考题	293
参考文献	293
第八章 层析成像	295
§ 8.1 投影数据和拉冬变换	296
§ 8.2 投影的中心频谱定理	300
§ 8.3 回投影、取和及模糊图像的重现	302
§ 8.4 二维滤波和一维滤波	304
§ 8.5 拉冬逆变换	307
§ 8.6 图像的光学模拟重现	311
8.6.1 投影数据的记录	311
8.6.2 非相干一维滤波处理系统	312
8.6.3 滤波函数的综合	313
§ 8.7 层析成像的代数模型	315
§ 8.8 圆谐波分解法	318
§ 8.9 三维拉冬变换	322

8.9.1	面积分	322
8.9.2	中心频谱定理	323
8.9.3	三维拉冬逆变换	323
8.9.4	回投影取和	324
§8.10	其他应用	326
8.10.1	发射型计算机层析成像 (ECT).....	326
8.10.2	核磁共振成像	331
8.10.3	康普顿散射	335
	思考题.....	337
	参考文献.....	337
第九章	编码孔成像	338
§ 9.1	称重设计和多元技术.....	338
§ 9.2	阿达玛编码.....	342
§ 9.3	阿达玛编码在光谱学和成像技术中的应用.....	344
9.3.1	阿达玛编码光谱仪	344
9.3.2	阿达玛变换成像	345
9.3.3	双重编码的光谱仪	347
9.3.4	用两个接收器实现阿达玛矩阵	351
§ 9.4	编码孔投影成像的一般原理.....	352
§ 9.5	圆环编码板.....	356
§ 9.6	菲涅耳环带板.....	364
§ 9.7	小孔列阵.....	369
9.7.1	无规及伪随机小孔列阵	369
9.7.2	均匀冗余孔阵	370
9.7.3	非冗余孔阵	373
§ 9.8	多编码孔的成像综合.....	374
9.8.1	多针孔成像综合	374
9.8.2	多随机孔阵成像	378
9.8.3	旋转狭缝	379
	参考文献.....	382
第十章	图像复原	383

§ 10.1	图像复原问题	383
§ 10.2	傅里叶频谱滤波复原	385
§ 10.3	线性代数复原方法	387
10.3.1	逆矩阵	387
10.3.2	有约束的逆矩阵	387
10.3.3	伪逆矩阵	389
10.3.4	本征分解	390
§ 10.4	非线性优化复原	391
10.4.1	正约束	391
10.4.2	最大事后概率法	392
10.4.3	极大熵复原	393
10.4.4	最大信息复原	395
10.4.5	蒙特卡罗方法	398
§ 10.5	不完全数据的图像复原	399
10.5.1	超分辨问题	399
10.5.2	相位复原问题	403
10.5.3	从有限角度范围的投影数据复原图像	404
	参考文献	406
附录 A	δ 函数	408
附录 B	傅里叶变换的基本定理	411
附录 C	基本傅里叶变换对	413
附录 D	基本零阶汉克尔变换对	415
附录 E	高斯随机过程	416
附录 F	阿达玛和 S 矩阵	419

第一章 图像、成像系统和信息

在讨论具体的成像系统以前，本章首先介绍关于图像和成像系统的基本概念、特征以及一般的分析方法，作为本书其他章节的基础。

和通信理论一样，傅里叶频谱分析在近代成像理论中也是最主要的分析方法。我们假定读者已熟悉傅里叶变换的基础知识。在附录中，摘引了傅里叶变换的基本定理以及常用的变换公式，以供查阅。

§ 1.1 将介绍图像信号分析的基本概念以及图像信号作为随机过程的分析方法。特别引入了维格纳 (Wigner) 分布函数和模糊函数，它们比傅里叶频谱包含更多的信息。§ 1.2 介绍成像系统作为线性平移不变系统的一般理论。§ 1.3 介绍图像的信息、成像系统的信息容量以及它们的编码与匹配。

§ 1.1 图像的基本性质

本节将介绍图像的基本定量描述和统计描述。这两方面都是分析不同成像方法和成像系统的重要基础。特别在现代成像系统中，经常包括了计算机数字图像处理的环节，因此对图像的各种定量描述(包括统计描述)是十分需要的。

1.1.1 图像的基本描述

图像的灰度

图像是被观察物体由成像系统转化为可目视观察的一定物理量的二维分布(有时也可以是一维或三维)。这个物理量一般称之为“灰度”，用 g 表示。它可以是感光乳胶的黑度、显示屏的亮度