

信息光学基础

清华大学光学仪器教研组



Guang Xue
Ji Chu

73·772
528
1

信息光学基础

清华大学光学仪器教研组



机械工业出版社

D037/28

信息光学是应用光学以及计算机和信息科学的边缘学科分支。本书在几何光学和物理光学的基础上提供了信息光学的基础。全书共10章。1~3章介绍光波的标量波理论、衍射性质及经过透镜的变换。4~7章分析光学成象系统、光学信息处理系统、全息术和计算机全息。8~9章提供有关光学信息处理中所用光学元件的光学知识。第10章扼要叙述计算机数字图象处理的原理和方法。全书偏重基本概念、原理、方法和系统分析，并从技术科学的角度提供了工程应用的理论基础。

本书可供从事光学、光学仪器、图象处理等专业的科技人员以及大专院校师生阅读。

信息光学基础

清华大学光学仪器教研组

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $16^{5/8}$ · 字数 864 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,800 · 定价 3.95 元

*

统一书号: 15033·5806

编者的话

光不仅是一种传统的能源，而且是一种重要的信息源。人类历史上利用光信息由来已久。光学仪器的迅速发展将近百年了，但是信息论和通信理论的引入，对光学科学发生深刻的影响，却是最近二、三十年的事情。特别是自六十年代初期激光问世以来，光学信息处理和全息术取得了飞速的发展。从信息论的观点，用傅里叶方法分析、解决了许多光学问题，已成为近代应用光学的标志。本书的目的就是为读者提供有关信息光学的基础。在经典物理光学的基础上阐明傅里叶光学的基本分析方法，对光学成像过程、光学信息处理系统、全息术以及光学信息处理所用器件的有关光学知识作一扼要介绍，并偏重基本概念、原理、方法和系统，从技术科学的角度为工程应用提供理论基础。叙述力求简明实用，而不单纯追求光学理论的系统性和完整性。我们设想读者已具有初步的有关物理光学，几何光学，傅里叶变换和线性代数等基础知识。这是本书的出发点。

全书共十章，可分为三个部分。第一部分是第一章到第三章，构成全书的理论基础。将光波作为一个标量波处理，讨论光衍射现象及其经过透镜的变换。第二部分包括第四章到第七章，叙述各类典型的光信息系统。第四章用空间频率特性方法分析相干、非相干和部分相干照明的成像系统。第五章列举相干和非相干、线性和非线性的各种光学信息处理系统。第六、第七两章讨论全息术和计算机制作全息图，着重说明它们的基本原理以及全息元件在光信息处理系统中的作用。第三部分涉及与光信息处理紧密相关的几个分支，由第八、九、十共三章组成，分别介绍傅里叶变换镜头的光

IV

学设计, 关于晶体光学、电光效应、光电效应和光调制器的知识, 以及数字图象处理的一般方法。附录中简要说明了高斯光束的性质。为了使读者易于了解, 书中把若干基本概念和定理结合于各章中介绍, 例如空间频率在第一章内说明, 线性系统和光的相干性结合成象过程作重点介绍, 抽样定理和空间带宽积在计算全息一章内讲解等等。由于信息光学正在不断发展, 许多方面还未形成比较完善的理论体系, 如光噪声、光编码和光信息存贮等问题, 尚有待更深入的探讨。

本书初稿是在 1979 年编写的, 借鉴国外尽快介绍新技术科学的通常作法, 组织多个作者分工编写各章节。书中有些内容及插图已为其他书籍所引用。经 1980、1981 年我校两届暑期讲习班和研究生班试用作教学参考讲义后再重新修订定稿。在整个编写过程中, 经常协商, 力求全书能够由浅入深, 互相呼应, 形成一个整体。编著者分工如下:

第一、二、三章 夏学江, 第四章、绪论 戚康男, 第五章 李达成、孙培懋、王民强, 第六章 杜玲 曹芒, 第七章 金国藩, 第八章 王民强, 第九章 殷纯永, 第十章 容观澳, 附录 姜亚南。初稿曾请一些兄弟院校、中国科学院和光学工业界有关单位审阅, 不少同志热诚地给本书提出了许多宝贵意见, 为此我们表示衷心感谢。

我校严瑛白、黄美珍、赵立人、李庆祥、贾惠波、毛文炜、虞祖良、王佳、杜立、刘杰、张娟等同志为本书编写、定稿和誊清工作提供了多方面的帮助。我校物理教研组液晶物理研究组提供了插图照片, 在此一并致以深切的谢意。

由于我们的水平有限, 书中错误和不妥之处, 望读者不吝指正。

清华大学精密仪器系光学仪器教研组

目 录

绪论	1
第一章 光波及其数学描述	7
1.1 光波与光场	7
(一) 光波、单色光与准单色光、标量波	7
(二) 波动方程	10
(三) 单色平面波与球面波	13
(四) 光强度	19
1.2 光波的复数表示	20
(一) 单色光波的复数表示法、复振幅	20
(二) 复振幅的运算	22
(三) 平面波与球面波的复振幅	25
1.3 光场中任一平面上的复振幅分布	26
(一) 平面波	28
(二) 球面波	30
1.4 空间频率与空间频率谱 (傅里叶变换)	32
(一) 空间频率概念 (复振幅空间频率的物理意义)	33
(二) 单色光波复振幅的分解、空间频谱 (傅里叶变换)	39
(三) 空间频谱计算举例	43
第二章 光的衍射理论基础	50
2.1 惠更斯-菲涅耳原理	50
2.2 衍射的标量波理论、衍射公式	53
(一) 亥姆霍兹方程、格林定理与基尔霍夫积分定理	54
(二) 平面屏上一定孔径的衍射、基尔霍夫衍射公式	60
(三) 关于基尔霍夫衍射公式的讨论、瑞利-索末菲衍射公式	65

2.3 菲涅耳衍射与夫琅和费衍射	67
(一) 菲涅耳衍射 (近场衍射) 与夫琅和费衍射 (远场衍射)	67
(二) 夫琅和费衍射图样举例	75
(三) 菲涅耳衍射计算举例	87
第三章 透镜的变换特性	89
3.1 光波通过透镜时位相分布的变化	89
3.2 透镜对点光源的成象	95
3.3 透镜的傅氏变换特性	99
(一) 物 (透光片) 在透镜之前	100
(二) 物 (透光片) 在透镜之后	110
3.4 透镜孔径的作用	114
(一) 点光源通过透镜成象	114
(二) 透镜孔径对傅氏变换面上光强的影响	116
第四章 光学成象系统的空间频率特性	121
4.1 线性系统	121
4.2 相干照明成象系统	125
4.3 振幅传递函数	134
4.4 非相干照明成象	137
4.5 光学传递函数	138
4.6 实际光学系统的传递函数	152
4.7 相干性	161
(一) 解析信号和互相干函数	162
(二) 时间相干性	166
(三) 准单色光与空间相干性	168
4.8 相干性的传播—冯·息陀特-蔡尼克定理	171
4.9 空间部分相干成象	175
第五章 光学处理系统	179
5.1 银盐感光材料介绍	179

(一) 术语的定义	179
(二) 胶片用于非相干光学系统中时	180
(三) 胶片用于相干光学系统中时	181
5.2 基本相干光处理系统	183
(一) 光学频谱分析系统	183
(二) 光学滤波系统	185
(三) 光学相关系统	191
(四) 混合处理系统	194
(五) 应用	195
5.3 非线性变换	203
5.4 梅林变换	206
(一) 原理	206
(二) 实现变换的光学方法	208
(三) 不受尺寸影响的 optical 相关	209
(四) 不受位移、转动、尺寸变化影响的相关系统	211
5.5 非相干光处理系统	213
(一) 空域运算的系统	214
(二) 频域分析的系统	222
5.6 光学反馈系统	223
(一) 基本的光学反馈系统	224
(二) 相干光学反馈系统	227
(三) 非相干光学反馈系统	230
5.7 合成孔径雷达	237
(一) 合成孔径概念	237
(二) 航向维信息记录	239
(三) 距离维信息记录	242
(四) 两维合成的雷达信号片	243
(五) 波面的重建	243
(六) 光学处理机	246

第六章 全息术	249
6.1 全息照相的基本原理	249
(一) 概述	249
(二) 全息照相的基本方程	250
(三) 波前记录	253
(四) 波前再现	261
6.2 非相干光全息照相	268
(一) 双象技术	268
(二) 消色差条纹系统	272
6.3 全息在信息处理中的应用	272
(一) 概述	272
(二) 全息空间滤波器的制作及其原理	273
(三) 全息空间滤波器的应用与种类	279
6.4 影响全息图象质量的因素	292
(一) 光源对全息象的影响	292
(二) 记录介质对全息象的影响	295
(三) 匹配滤波器最优参数的选择	302
第七章 计算全息与相息图	307
7.1 计算全息的理论基础	308
(一) 空间脉冲调制	308
(二) 抽样定理	313
(三) 空间带宽积	321
7.2 计算全息图的制作	323
7.3 计算全息干涉图	336
(一) 二元全息函数	336
(二) 基本方程	341
(三) 全息干涉图的制作	345
7.4 相息图	347
7.5 计算全息图的应用	349

(一) 空间滤波器	349
(二) 干涉量度	355
(三) 全息图扫描器	357
第八章 傅里叶变换透镜	363
8.1 傅变透镜的规格和性能指标	363
8.2 傅变透镜的特点	365
8.3 傅变透镜型式简介	370
第九章 光学信息处理的光学器件	375
9.1 晶体光学有关知识	375
(一) 晶系	375
(二) 晶列指数和密勒指数	376
(三) 光在晶体中的传播	376
(四) 光折射率椭球	379
9.2 电光效应及其应用	380
(一) 电光效应	380
(二) 电光调制	384
(三) 电光偏转	389
9.3 光电效应及材料	394
(一) 能带	394
(二) 光电导效应和材料	395
(三) 光生伏特效应	396
(四) 光电子发射效应和二次电子发射	398
(五) 电荷耦合器件	399
9.4 空间光调制器	400
(一) 普克尔效应空间光调制器	401
(二) 液晶光调制器	411
(三) 变形器件	417
(四) 铁电材料和器件	418
(五) 其他器件	420

X

9.5 声光效应及其应用	420
(一) 应变张量	420
(二) 弹光效应	420
(三) 声光效应	422
(四) 声光器件的应用	425
第十章 数字图象处理	426
10.1 数字图象基础	426
(一) 数字图象处理的特点	426
(二) 光学图象处理与数字图象处理的比较	430
(三) 人的视觉和图象评价的标准	432
(四) 图象的离散正交变换	434
(五) 数字图象处理系统	435
10.2 数字图象增强	436
(一) 直方图修改法	436
(二) 直方图均衡化法	439
(三) 图象平滑	444
(四) 图象鲜明化	448
(五) 伪彩色图象处理	451
10.3 图象复原	456
(一) 图象的退化模型	457
(二) 循环矩阵的对角化	462
(三) 逆滤波法图象复原	464
(四) 运动图象的复原	465
(五) 对话型图象复原	467
10.4 图象的编码	469
(一) 数字图象编码过程	469
(二) 熵	474
(三) 霍夫曼码和费诺码	476
(四) 其他编码及应用	478

10.5 数字图象分割	479
(一) 灰度级门限化的分割	479
(二) 样板匹配法检出图象的点、线、边缘	482
(三) 区域生长求图象边缘	487
10.6 图象区域的描绘	488
(一) 傅里叶描绘符	488
(二) 矩描绘符	491
(三) 拓扑描绘符	493
(四) 关系描绘	495
附录	505
(一) 高斯光束的性质	505
(二) 高斯光束通过薄透镜时的变换	510
(三) 高斯光束的聚焦	513
参考文献	517

绪 论

科学技术就是组成社会生产力的一个重要因素。社会生产水平最终决定人类改造自然的能力和范围，也就决定了科学技术工作的任务、性质和规模。工业革命从18世纪60年代开始，它以纺纱机与蒸汽机的发明为先导，建立了机器生产为主体的近代生产体系。因此，近代科学技术研究的主要任务必然是揭示物质运动的能量传递和转换的规律。本世纪中叶以来，现代生产体系日益趋向于自动化的机器大生产，世界性的协作不断加强。随着自动控制、通讯、电子计算机的迅猛发展，信息科学的形成及其对各个领域的渗透已经成为现代科学技术的重要标志。信息的表现形式是多种多样的。例如人的语言是社会信息，遗传密码是生物信息，计算机程序是技术信息等等。人们从大量实践中逐渐认识到：信息运动是物质运动总体的一个方面，它与能量运动存在于统一的物质运动之中。信息借助一定的物质作为载体才能存在、传递或变换，同时必须伴有一定的能量。信息变换过程包括信息的接收、存取和处理。无线电波本质上是经过调制的电磁波。它是携带电信息的常见形式。从一切自然景象、照相、电视到光衍射图和干涉条纹都包含大量的光信息。“百闻不如一见”，这就是指人们的视觉印象，通过光信息来认识世界是人类其他感官所不可比拟的。

光学是研究光的本性、光的产生、传输、接收及光与物质相互作用规律和特性的一门科学。当然，人们也是主要从

8610623

光的能量和信息两个侧面加以研究。四十年代以来,由于电子技术、半导体技术、计算机技术、信息论等新兴学科与应用光学的互相渗透、互相交叉的结果,产生了一系列光学学科中新的生长点。现代应用光学与光学工程就其范围来说,可以分为光能量技术和光信息技术两大方面。照明工程、激光武器、激光加工、太阳能利用等都属于如何有效地利用光辐射能量的光能量技术。光信息技术主要包括以下三个分支: 1) 光学量测试技术—它以光强、位相、波长、频率、旋光度等光信息的空间分布和随时间的变化作为测试对象,或者将非光量信息转换为光信息加以测量。如光谱分析、光度测量,干涉计量、莫尔条纹测量等等。2) 光信息处理—它以信息光学为基础,用傅立叶分析的方法研究光学成像和光学变换的理论和技巧;实现图象的改善和增强、图象识别、图象的几何畸变与光度的规整和纠正,光信息的编码、存储和成图技术,三维图象显示和记录,仿生视觉系统,以及电、声等非光信号的光信息处理等等。3) 光纤通信—用纤维光缆代替金属电缆,实现传输量大、防干扰性好、保密性强、耗电少的新型通信线路,将是近年迅速发展中的一个领域。

光学作为一门古老而又年青的科学,由于信息光学、统计光学、波导光学、集成光学、空间光学、海洋光学、仿生光学的相继产生和发展,呈现出空前蓬勃的景象和强大的生命力。六十年代以来,由于激光的出现,傅里叶光学促进了图象科学与工程 (Image Science and Engineering) 的发展。新型的电光、光电材料的不断发明,形成了崭新的光电子学 (Optoelectronics)。应用光学与光学工程 (Applied Optics and Optical Engineering) 与电子学的关系日益密切,互相推动,展望未来必有更为突飞猛进的发展。我们

把“信息光学”作为光信息处理的理论基础，它是物理光学、信息科学和光电子学相交叉的一个学科分支。本书将在经典物理光学的基础上，阐明傅里叶光学的分析方法，对光学成像过程、光信息处理系统、全息照相以及光信息处理用元器件的有关光学知识作一系统叙述，从技术科学的角度为工程应用提供理论基础。此外，既然把光作为信息的载体，还应该研究光信息传输和变换的有效性、可靠性以及系统抗干扰的能力。这就是说，有必要对光编码、光噪声、光存贮以及信息传输过程中光量子效应等问题作全面的探讨。但是这些方面有待系统总结，同时限于篇幅，就不在本书详细讨论了。

计算机科学与工程的发展，已经给人类生活各个方面带来了深刻的变革。现代科学技术发展要求不断提高计算机的运算速度与通信系统的容量。从这个意义上来说，电子计算机正面临光学计算机的挑战。换句话说，光信息处理与光通信急速发展的原因是由于光波本身物理本质上的优越性。电子计算机的高速化有以下三方面的限制：

1) 量子力学的限制 海森堡测不准原理告诉我们，一般在时间 τ 内观测物理现象的能量 ΔW 与 τ 成反比

$$\Delta W = h / \tau$$

式中 h ——普朗克常数。

电脉冲信号能量应取更大的数值。提高运算速度意味着能耗大幅度增加。

2) 热力学限制 信号功率必须大于热噪声的功率，才能保证有足够的信噪比。而正常温度条件下工作的热噪声总有一定的水平。

3) 电子线路技术的限制 实际线路有一定阻抗，为了便于散热，元件之间应保持最小的间隔。

再来考察电子通信容量的限制。微波频率约比光波频率低四个数量级，微波通信容量自然低于光通信。此外，电路内部有反馈、阻抗，外部有感应噪声；而光通信没有阻抗限制，可以立体交叉，有利于微型化。

对比之下，光信息处理具有以下特点：

1) 易于实现二维和三维光信息的并列处理，特别有利于快速图象处理；

2) 运算速度快，基本上按光速进行。目前全息片的存取速度已达 10^{12} 帧/秒。

3) 光信息容易模拟其他物理量信息，如微波天线电磁场的模拟和超声波的模拟等。由于光波波长短，模拟装置的几何尺寸大大缩小。

4) 由于光学装置受到光学材料及记录介质质量等的限制，产生光噪声的因素较多，到现在为止，运算精度还不高，一般只能达百分之几。

5) 目前光信息处理还主要处于模拟运算阶段，线性变换中以傅里叶变换最易实现。非线性变换及空间变处理系统正在深入研究。所以与数字电子计算机相比，运算的灵活性较差。

现在来简单回顾一下光信息处理的发展历史。原始的光信息处理方法可以追溯到著名的佛科刀口检验与辉纹法，它们都是以弱衍射效应为基础，从可见的光场中提取必要的信息。1873年E. Abbe对显微镜成象的探讨，阐明了光学系统分辨率与物面空间频谱的联系；1906年Porter实现了空间滤波的实验。这些公认是相干光处理系统的先驱。1927年Michelson说明了再现记录的衍射图样叠加重要的位相信息后成象的过程。最早最有效的光学处理系统恐怕要算1935年

F. Zernike的相衬显微镜了,它成功地运用了空间滤波。更大的突破是1948年D. Gabor在研究电子显微镜分辨率的同时,提出以菲涅尔衍射成象构成的全息术。这项技术由于后来应用激光而获得成功的发展。本世纪30、40年代期间,非相干光的模拟处理装置也有了较大的进展。以上可称为光信息处理的萌芽时期。

衍射成象理论是以傅里叶积分变换为数学工具的。P. Duffieux于1946年以后开始应用于光学系统成象理论,对象质评价方法、光学系统设计和性能测试有了很大的促进。美国于50年代成功地实现了模拟雷达信号处理及相控阵列雷达信号处理系统。1963年辻内顺平采用了真空镀膜制作逆滤波器来处理模糊图象。A. Marechal用空间滤波方法来消除图片的网点、抽出轮廓、改变图象的对比。60年代激光问世以后,相干光处理系统发展很快。1962年E. Leith和J. Upatniks拍摄和重现了离轴全息图。1964年A. Vander-Lugt用全息空间滤波器作了字符识别实验。从此各国许多光学和计算机研究部门纷纷从事光信息处理的研究,出现了许多研究报告和专著。在合成孔径雷达信息处理、声纳信号处理、地震法物理勘探波形分析、图象加强和复原、图样识别、航空摄影测量图光学处理、非破坏检查、晶体结构分析、光学计量以及生物医学等各方面都获得了初步的应用。

光信息处理作为一个新的技术科学分支还远远没有达到成熟和广泛实用的阶段。在基础理论和系统方面:光学一般变换、非线性变换系统、空间变相干光处理系统、部分相干性理论、相干与非相干光的转换机制等等尚待深入的研究。由于相干系统的光噪声问题不易克服,近年来对非相干光和白光