

★ ★ ★ ★
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
国防现代化建设

现代光学与光子学理论和进展丛书

丛书主编：李 林

名誉主编：周立伟

Fourier Optics Principle and System Design

傅里叶光学原理与 系统设计

李林 谢敬辉 廖宁放 成一诺 著

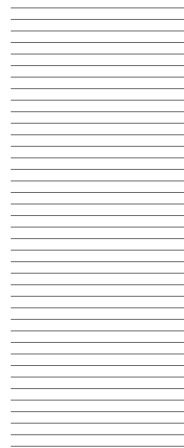


国家重点出版物出版规划项目

现代光学与光子学理论和进展丛书

丛书主编：李 林

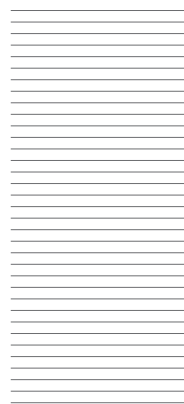
名誉主编：周立伟



傅里叶光学原理与 系统设计

Fourier Optics Principle and
System Design

李林 谢敬辉 廖宁放 成一诺 著



内 容 简 介

本书系统而深入地介绍了傅里叶光学及其光学系统设计的基本概念、基础理论, 以及在一些研究领域的应用。全书内容共分 7 章, 其中第 1 章和第 2 章介绍了从波动光学过渡到傅里叶变换光学的主要基础理论, 第 3 章~第 6 章分别介绍了光学传递函数、全息术、光学信息存储、傅里叶光谱技术的系统知识, 第 7 章则介绍了傅里叶变换镜头及光学信息处理系统的设计知识。

本书可作为高等院校光电类本科生及研究生教材, 也可作为相关研究领域科技人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

傅里叶光学原理与系统设计 / 李林等著. —北京: 北京理工大学出版社, 2021.3
(现代光学与光子学理论和进展丛书)
“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程
ISBN 978-7-5682-9638-0

I. ①傅… II. ①李… III. ①傅里叶光学-理论②傅里叶光学-系统设计
IV. ①O438.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 053076 号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮 编 / 100081
电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>
经 销 / 全国各地新华书店
印 刷 / 固安县铭成印刷有限公司
开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 23

字 数 / 400 千字

版 次 / 2021 年 3 月第 1 版 2021 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 108.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- | | |
|-----|-----------------|
| 于全 | 中国工程院院士 |
| 王越 | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 王小谟 | 中国工程院院士 |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长 |
| 王哲荣 | 中国工程院院士 |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 邓玉林 | 国际宇航科学院院士 |
| 邓宗全 | 中国工程院院士 |
| 甘晓华 | 中国工程院院士 |
| 叶培建 | 人民科学家、中国科学院院士 |
| 朱英富 | 中国工程院院士 |
| 朵英贤 | 中国工程院院士 |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 刘大响 | 中国工程院院士 |
| 刘辛军 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士 |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士 |
| 孙逢春 | 中国工程院院士 |
| 苏东林 | 中国工程院院士 |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 苏哲子 | 中国工程院院士 |
| 李寿平 | 国际宇航科学院院士 |



- 李伯虎** 中国工程院院士
- 李应红** 中国科学院院士
- 李春明** 中国兵器工业集团首席专家
- 李莹辉** 国际宇航科学院院士
- 李得天** 国际宇航科学院院士
- 李新亚** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨绍卿** 中国工程院院士
- 杨德森** 中国工程院院士
- 吴伟仁** 中国工程院院士
- 宋爱国** 国家杰出青年科学基金获得者
- 张彦** 电气电子工程师学会会士、英国工程技术
学会会士
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆军** 中国工程院院士
- 陆建勋** 中国工程院院士
- 陆燕荪** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈谋** 国家杰出青年科学基金获得者
- 陈一坚** 中国工程院院士
- 陈懋章** 中国工程院院士
- 金东寒** 中国工程院院士
- 周立伟** 中国工程院院士



- 郑纬民 中国工程院院士
- 郑建华 中国科学院院士
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 中国工程院院士
- 赵沁平 中国工程院院士
- 郝 跃 中国科学院院士
- 柳百成 中国工程院院士
- 段海滨 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 侯增广 国家杰出青年科学基金获得者
- 闻雪友 中国工程院院士
- 姜会林 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 康 锐 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 谭春林 航天系统开发总师



丛书序

光学与光子学是当今最具活力和发展最迅速的前沿学科之一。近半个世纪尤其是进入 21 世纪以来，光学和光子学技术已经发展成为跨越各行各业，独立于物理学、化学、电子科学与技术、能源技术的一个大学科、大产业。组织编撰一套全面总结光学与光子学领域最新研究成果的现代光学与光子学理论和进展丛书，全面展现光学与光子学的理论和整体概貌，梳理学科的发展思路，对于我国的相关学科的科学研究的科学研究、学科发展以及产业发展具有非常重要的理论意义和实用价值。

为此，我们编撰了《现代光学与光子学理论和进展》丛书，作者包括了德国、美国、日本、澳大利亚、意大利、瑞士、印度、加拿大、挪威、中国等数十位国际和国内光学与光子学领域的顶级专家，集世界光学与光子学研究之大成，反映了现代光学和光子学技术及其各分支领域的理论和应用发展，囊括了国际及国内光学与光子学研究领域的最新研究成果，总结了近年来现代光学和光子学技术在各分支领域的新理论、新技术、新经验和新方法。本丛书包括了光学基本原理、光学设计与光学元件、现代激光理论与技术、光谱与光纤技术、现代光学与光子学技术、光信息处理、光学系统像质评价与检测以及先进光学制造技术等内容。

《现代光学与光子学理论和进展》丛书获批“十三五”国家重点图书出版规划项目。本丛书不仅是光学与光子学领域研究者之所需，更是物理学、电子科学与技术、航空航天技术、信息科学技术、控制科学技术、能源技术、生物



技术等各相关研究领域专业人员的重要理论与技术书籍，同时也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

光学与光子学将是未来最具活力和发展最迅速的前沿学科，随之不断发展，丛中难免存在不足之处，敬请读者不吝指正。

作 者

2020年5月于北京



前 言

从 20 世纪 40 年代起,一批物理学家开始应用电子学中的通信理论和信息理论,特别是其中的傅里叶分析(频谱分析)方法来研究光学问题,包括光波的传播、光的衍射、波前的记录与再现、光学系统成像等问题,逐渐形成了现代光学的一个新的分支——傅里叶光学。激光器的发明,促进了傅里叶光学的发展,使其成为一门具有广泛用途的新学科。

电子学和光学之间,存在着一系列本质上的联系。首先,无论是电子学中的通信系统还是光学系统,都是用来获取或传递信息的,只不过,前者处理的信息是时间性的(例如被调制的电压或电流波形),而后者处理的信息既包含时间性的(例如颜色),更多的则是空间性的(例如光波的复振幅或光强的分布)。但从波动的本质来看,电信号和光信号都是电磁波,只不过分属于电磁波谱中的不同波段而已。这两门学科之间的紧密联系还在于,许多电子学和光学系统都具有线性和平移不变性。对于电子系统,称为线性时间平移不变性;对于光学系统,则称为线性空间平移不变性。因此这两种系统都可以应用同样的理论和数学方法——傅里叶分析和线性系统理论来描述和处理。在电子学中,傅里叶分析方法不过是一种传统的方法,而在光学领域,则是一种崭新的方法。应用傅里叶分析的方法来处理光波的传播、光波的叠加(干涉和衍射)和成像等光学现象,不仅使我们加深了对这些现象内在规律的理解,丰富了波动光学理论,而且产生了一系列具有深远意义的应用。

傅里叶光学是光学与电子学和通信理论相结合的新学科,是现代光学的核心。近年来,傅里叶光学与计算机技术、数字多媒体技术、光电技术和精密微细加工技术相结合,研究呈蓬勃发展势态,出现了许多新的研究热点,如数字全息术、数字化光信息处理、光学 CT、傅里叶成像光谱技术等。为适应现代



化建设和教学改革的需要,为实现创办国际知名、国内一流、高水平研究型大学的目标,我们编写了这本书。本书为《现代光学与光子学理论和进展》丛书之一,系统地介绍了傅里叶光学及其光学系统设计的基本概念、基础理论,以及在相应研究领域中的应用。

本书是作者几十年来在傅里叶光学领域从事研究和教学工作的基础上编写的,其中的主要章节和习题一直作为北京理工大学光学工程、物理电子学、仪器科学与技术等学科的研究生教材使用,不仅包含了作者对傅里叶光学的理解和研究成果,更从金国藩、于美文、赵达尊、刘培森、邬敏贤等众多名师的研究著述和传道授业中吸取了丰富的知识和成果。本书是北京理工大学“211工程”研究生规划教材丛书之一,是北京理工大学光电学院研究生学位课的选定教材,同时也可供大学测控技术与仪器类、光电信息科学与工程类和理科光学类的本科高年级学生选学,以及作为相关领域的科技人员参考书。全书共分7章,其中第1、2章介绍傅里叶光学的基础理论;第3~第6章则分别介绍了傅里叶光学几个相对独立的研究分支,特别是包含了目前信息科学领域最活跃的一些研究方向;第7章介绍了傅里叶光学镜头的光学设计。第1章~第5章由北京理工大学谢敬辉撰写,第6章由北京理工大学廖宁放撰写,第7章由北京理工大学李林撰写,清华大学精密仪器系博士、哈佛大学科学与应用工程博士后成一诺参与了第7章的撰写工作,并对全书进行了资料收集、整理、编排和修改,李林对全书进行了统稿和修改。作者的很多老前辈及所带的研究生为本书的出版作出了很多贡献,作者在此一并表示衷心感谢!

傅里叶光学原理与系统设计是一门综合性的学科,它还将不断发展,本书中存在的不足之处,敬请读者不吝指正。

作 者

2020年5月于北京



目 录

第 1 章 傅里叶光学的数理基础	001
1.1 常用非初等函数与特殊函数	002
1.1.1 常用非初等函数	002
1.1.2 δ 函数和梳状函数	011
1.1.3 贝塞尔函数	021
1.2 傅里叶变换的基本概念及运算	025
1.2.1 傅里叶级数及频谱的概念	025
1.2.2 一维傅里叶变换的定义和运算举例	027
1.2.3 广义傅里叶变换	030
1.2.4 二维傅里叶变换	032
1.3 卷积和相关	035
1.3.1 卷积的定义和运算	035
1.3.2 卷积的基本性质	037
1.3.3 互相关函数	041
1.3.4 自相关函数	043
1.4 傅里叶变换的性质和有关定理	045
1.4.1 傅里叶变换的性质	045
1.4.2 傅里叶变换定理	049
1.5 光波的傅里叶分析	059
1.5.1 平面波基元函数分析方法	059
1.5.2 复杂波的分解	060
习题	064



第 2 章 光的衍射及光学傅里叶变换	067
2.1 衍射问题概述	068
2.2 球面波衍射理论	070
2.2.1 惠更斯-菲涅耳原理	070
2.2.2 基尔霍夫衍射积分公式	073
2.2.3 菲涅耳衍射与夫琅和费衍射	076
2.2.4 一维孔径的衍射	079
2.2.5 在有限距离观察夫琅和费衍射的方法	081
2.2.6 计算衍射问题的傅里叶变换方法	085
2.3 平面波角谱理论	087
2.3.1 角谱的传播	088
2.3.2 角谱理论的非涅耳近似	090
2.3.3 泰伯效应	091
2.4 透镜的傅里叶变换性质	092
2.4.1 薄透镜的位相变换因子	093
2.4.2 透镜的傅里叶变换性质	095
2.5 傅里叶变换运算的光学模拟	100
2.5.1 光学傅里叶变换系统	100
2.5.2 傅里叶变换运算的光学模拟	103
习题	105
第 3 章 光学成像系统的频谱分析	109
3.1 二维线性系统分析	111
3.1.1 系统	111
3.1.2 线性系统与叠加积分	112
3.1.3 线性空间不变系统与卷积	113
3.2 光学系统的频域描述: 传递函数	114
3.2.1 线性不变系统的频域描述	115
3.2.2 线性空间不变系统的本征函数	116
3.2.3 传递函数	117
3.3 光学成像系统的相干传递函数	117
3.3.1 物理模型	118
3.3.2 衍射受限系统的相干传递函数	119
3.3.3 相干传递函数与光瞳函数的关系	122
3.3.4 像差的影响	124



3.4	光学传递函数	124
3.4.1	非相干成像系统的物像关系	124
3.4.2	光学传递函数的定义和物理意义	125
3.4.3	光学传递函数和光瞳函数的关系	127
3.4.4	像差对 OTF 的影响	131
3.5	相干与非相干成像系统的比较	134
3.5.1	像强度的频谱	134
3.5.2	两点分辨率	136
3.5.3	线扩散函数和边缘扩散函数	138
3.6	OTF 的计算	139
3.6.1	计算光学传递函数的几何光学方法	140
3.6.2	计算光学传递函数的物理光学方法	142
3.7	OTF 的测量	144
3.7.1	OTF 测量概述	144
3.7.2	刀口扫描法	145
3.7.3	变频光栅扫描法	147
	习题	151
第 4 章	全息术	155
4.1	全息术的基本原理	156
4.1.1	波前记录	157
4.1.2	波前重现	158
4.2	平面全息图理论	159
4.2.1	菲涅耳全息图	160
4.2.2	傅里叶变换全息图	168
4.2.3	像全息图和彩虹全息图	171
4.2.4	位相全息图	173
4.2.5	平面全息图的主要性能参数	175
4.3	体积全息图	179
4.3.1	体积全息图的记录和再现	180
4.3.2	耦合波理论	182
4.3.3	透射式体积全息图的衍射效率及布喇格选择性	188
4.3.4	反射式体积全息图的衍射效率及布喇格选择性	193
4.4	真彩色全息图	196
4.5	计算机全息图	197



4.5.1	迂回位相法计算机全息图	197
4.5.2	改进的离轴计算机全息图	199
4.5.3	计算机干涉全息图	200
4.5.4	二元光学元件	203
4.6	全息术的应用	205
4.6.1	全息显示技术	206
4.6.2	全息干涉测量	208
4.6.3	全息光学元件	211
4.6.4	数字全息显微术	215
4.6.5	光学扫描全息术	216
	习题	221
第5章	现代光学信息处理	225
5.1	早期研究成果	227
5.1.1	阿贝成像理论	227
5.1.2	阿贝-波特实验	228
5.1.3	相衬显微镜	229
5.2	复空间滤波器的综合	231
5.2.1	万道朗特滤波器的综合	231
5.2.2	相干光卷积和相关运算	233
5.3	光学图像识别	234
5.3.1	基于匹配滤波的光学图像识别	234
5.3.2	实时图像识别系统	237
5.3.3	平移、缩放、旋转不变图像识别	239
5.3.4	联合傅里叶变换相关器	242
5.3.5	畸变不变联合傅里叶变换相关器	246
5.4	改善图像质量的相干光处理技术	248
5.4.1	逆滤波和图像消模糊	249
5.4.2	图像的微分滤波和边缘增强	251
5.5	非相干和部分相干光信息处理	253
5.5.1	非相干与相干光信息处理	253
5.5.2	非相干光处理系统	254
5.5.3	合成孔径技术	255
5.5.4	计算机层析摄影术	259
5.5.5	部分相干光处理系统	261



5.5.6 部分相干光处理的应用	265
习题	270
第 6 章 傅里叶光谱技术	275
6.1 傅里叶光谱技术基本理论	276
6.1.1 傅里叶光谱原理	277
6.1.2 傅里叶光谱系统的性能优势	282
6.1.3 光谱分辨率	285
6.1.4 仪器谱线函数	288
6.1.5 干涉图的采样间隔	291
6.1.6 光谱变迹术	294
6.1.7 位相误差校正	296
6.1.8 光谱 FFT 重建	299
6.2 成像型傅里叶光谱技术	304
6.2.1 时间调制干涉光谱成像	304
6.2.2 空间调制干涉光谱成像	305
6.2.3 高通量干涉光谱成像	309
6.2.4 偏振干涉光谱成像	311
6.2.5 分波前干涉光谱成像	316
6.2.6 CT 投影干涉光谱成像	318
习题	323
第 7 章 光信息处理光学系统的设计	325
7.1 光信息处理光学系统及傅里叶变换镜头	326
7.2 光学系统像质评价方法	329
7.2.1 几何像差的定义及其计算	330
7.2.2 垂轴像差的概念及其计算	333
7.2.3 用波像差评价光学系统的成像质量	334
7.2.4 光学传递函数	335
7.2.5 点列图	335
7.2.6 包围圆能量	335
7.3 光信息处理光学系统设计	337
7.4 光信息处理光学系统设计实例	341
参考文献	348



第1章

傅里叶光学的数理基础

傅里叶变换是现代科学技术研究中十分重要的数学工具，在信息科学技术领域（例如电子、通信、自动控制、射电天文、遥感地理、生物医学等）中有着广泛的用途。特别是在现代光学研究中，由于傅里叶分析（频谱分析）方法的引入，逐渐形成了现代光学的一个重要分支——傅里叶光学。

尽管傅里叶光学采用了和经典光学完全不同的思想方法和解析方法，即空间频谱的分析方法，但是其物理内容和所研究的对象仍然是有关光波的传播、分解与叠加（干涉、衍射、偏振）和光学系统成像的规律，只不过，由于傅里叶分析方法的引入，使得对上述现象的本质和内在规律有了更为深入的了解。并且，在激光和光电子技术的推动下，开辟了许多新的应用领域。

为了能够较深入地理解和掌握傅里叶光学的解析方法和思想方法，以便熟练地应用这种新的分析方法来研究各种具体的光学过程及现象，本章将集中介绍与傅里叶光学有关的数学基础知识和物理概念。