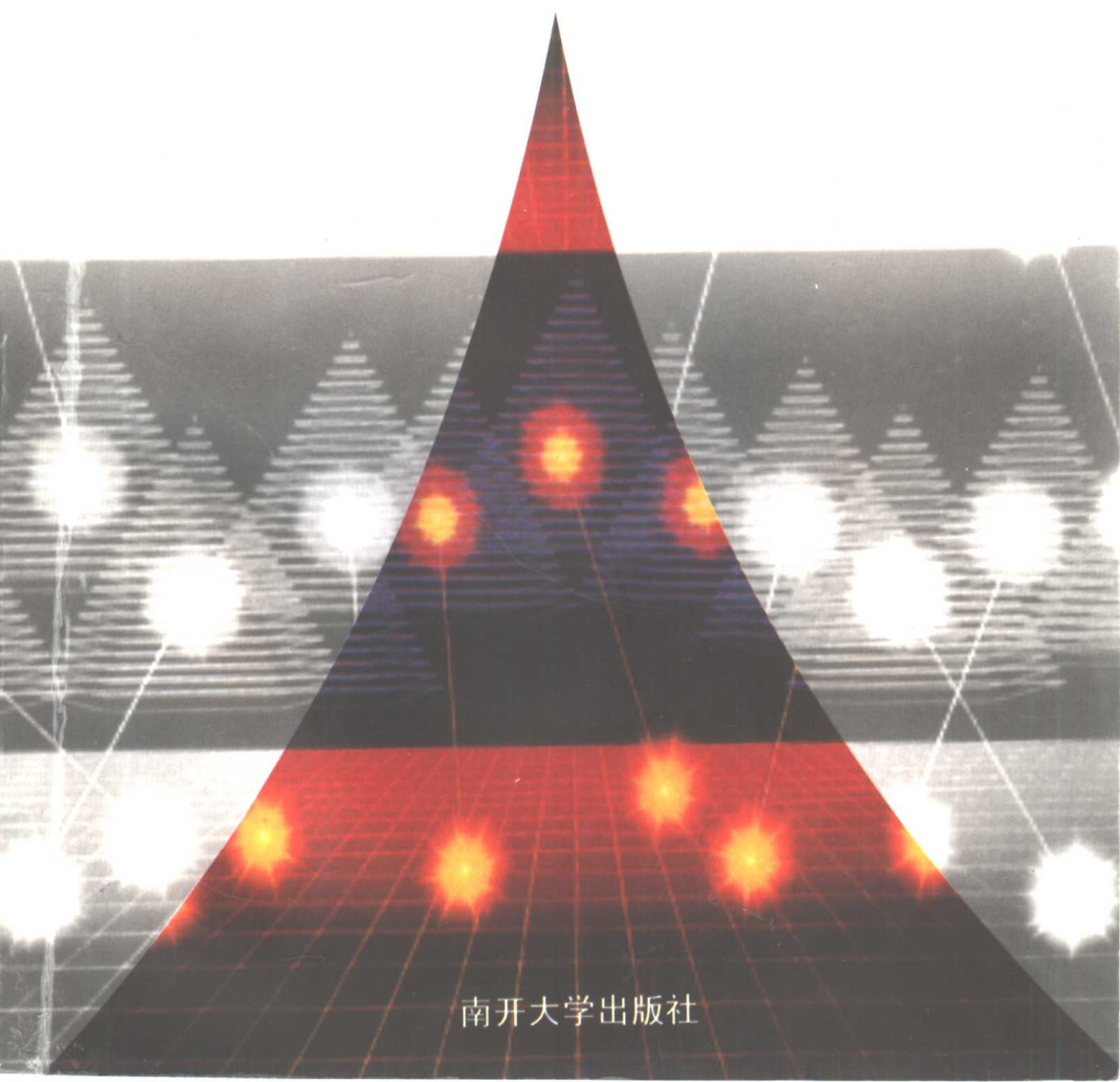


相干光学

原理及应用

XIANGGAN GUANGXUE
YUANLI JI YINGYONG

刘思敏 许京军 郭 儒 编著



南开大学出版社

本书由国家自然科学基金委员会资助出版

相干光学原理及应用

刘思敏 许京军 郭儒 编著

南开大学出版社

·天津·

内容简介

本书以干涉、衍射和傅里叶变换为理论基础,全面、系统、深入地阐明了相干光学的基本原理、理论及其主要应用。全书共分为11章。其中包括相干光学主要领域内当前国内外最新发展水平、动态、最新仪器以及测量方法、技术和相关理论。通过本教材的学习,读者不仅能了解相干光学的基本理论,而且可以了解国内外在相干光学的前沿学科方面的技术发展水平及应用前景。

本书可作为物理、光学及相关专业的大学生和研究生的教学参考书,也可供有关科学工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

相干光学原理及应用/刘思敏编著. —天津:南开大学出版社, 2001.1

ISBN 7-310-01409-X

I. 相... II. 刘... III. 相干光—理论 IV. 043

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 18919 号

出版发行 南开大学出版社

地址:天津市南开区卫津路 94 号

邮编:300071 电话:(022) 23508542

出版人 肖占鹏

承印 河北永清第一胶印厂印刷

经销 全国各地新华书店

版次 2001 年 1 月第 1 版

印次 2001 年 1 月第 1 次印刷

开本 850mm×1168mm 1/32

印张 13.25

字数 330 千字

印数 1-1 000

定价 19.00 元

前 言

激光器的出现使光学进入了相干光学的新时代。近年来，相干光学已从全息术、干涉术拓展到相当广阔的领域，它在科学、技术的许多方面已有诸多应用，因而出现了我们尚不熟悉的不少新领域、新概念。本书的目的不仅是使读者了解相干光学的基本理论，而且向读者展示了国内外在相干光学主要领域的技术发展水平和潜在的应用前景，介绍了最新的测量方法、技术和相关理论，还涉及了某些前沿课题和学科的最新动态，其中包括作者在长期的科研和教学工作中积累的体会、心得与创见。

值得一提的是，1995年我们有幸看到了刚刚出版的“Coherent Optics - Fundamentals and Applications”(W. Lauterborn, T. Kurz, M. Wiesenfeldt, Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York)一书。该书的特点是物理概念清晰，深入浅出，避开了大量繁琐的数学推导，图文并茂，对有些问题的处理方法可谓超凡脱俗，令人耳目一新，特别是傅里叶光学一章写得很出色。它用光学傅里叶变换方法处理了衍射现象，使得以往在光学教科书中与傅里叶光学相分离的大量有关衍射的陈述，变得一目了然。这使读者进一步明确了光学傅里叶变换是分析远场衍射的有力工具，它使得光学滤波和信息处理变得十分简单。该书将傅里叶光学、衍射与光学信息处理这三者融为一体，清晰简洁。因而从那时起，我们就产生了一种想法和愿望，希望能把这本书的精华部分介绍给我国的广大读者。在此基础上我们作了重新编写，并结合我们科研工作的感受和相干光学的发展，增加了一些我们体会较深和我们认为有必要阐述的内容，例如，第7章光折变非线性光学，第8章非线性光学材料，第10章导波光学与集成光学，第11章生命科学和环境科学中的光学，均为新增加的内容，其它章节也重新编写

并增加了部分内容。我们希望呈现在读者面前的是一本更为全面、更为深刻、更为新颖地反映相干光学主要领域面貌的教科书。

在编排方式上，本书的插图中的文字一律采用英文，意在利于读者阅读外文文献时参照。

全书共分 11 章，其中第 1、2、3、5、9、10 章由刘思敏撰写，第 4、11 章由许京军撰写，第 6、7 章由郭儒撰写，第 8 章由刘思敏和郭儒共同编写。

由于作者水平所限，难免有不当及错误之处，恳请读者批评、指正。

作 者

1999 年 2 月

目 录

第 1 章 相干和干涉术	1
1.1 相干条件和对比度	1
1.2 空间相干性与杨氏干涉仪	2
1.3 相干时间与相干长度	5
1.4 时间相干性与迈克耳孙干涉仪	8
1.5 空间-时间相干	16
1.6 傅里叶变换光谱仪	18
1.7 干涉仪和干涉术	20
1.7.1 马赫-曾德尔干涉仪	21
1.7.2 Sagnac 干涉仪	22
1.7.3 星体干涉术	26
1.8 强度相关和相关干涉术	27
第 2 章 多光束干涉	31
2.1 法布里-珀罗干涉仪	31
2.2 激光器的纵模谱	39
2.2.1 干涉光谱学	39
2.2.2 差频分析	43
第 3 章 傅里叶光学	45
3.1 光波的空间频率和复振幅	46
3.1.1 光波的空间频率	46
3.1.2 光波的复振幅描述	48
3.2 光波标量衍射理论	49

3.2.1	菲涅耳近似	50
3.2.2	夫琅和费近似	52
3.3	用透镜进行傅里叶变换	55
3.4	光学傅里叶变换频谱	57
3.4.1	点光源	57
3.4.2	平面波	58
3.4.3	狭缝	59
3.4.4	两个点光源	62
3.4.5	余弦光栅	62
3.4.6	圆形光阑	64
3.4.7	复合衍射系统	66
3.5	相干光学滤波	69
3.5.1	阿贝两步成像原理	69
3.5.2	阿贝-波特空间滤波实验	70
3.5.3	$4f$ 系统	71
3.5.4	低通滤波器或空间频率滤波器	72
3.5.5	高通滤波器或暗场方法	73
3.5.6	相位滤波器或相衬方法	74
3.5.7	半平面滤波器或纹影方法	75
3.5.8	实验证明	76
3.5.9	全息滤波器或匹配滤波器	77
3.5.10	图样识别	79
附录:	傅里叶变换	82
A.1	一维傅里叶变换	82
A.2	二维傅里叶变换	83
A.3	卷积和自相关	84
A.4	傅里叶变换的性质	85

第4章 全息术	89
4.1 全息术原理	89
4.1.1 全息图记录	89
4.1.2 图像再现	93
4.1.3 像的位置	94
4.1.4 相位共轭	95
4.2 全息术的成像方程	97
4.3 全息图的记录装置	102
4.3.1 同轴(In-Line)全息图	102
4.3.2 反射全息图	103
4.3.3 透射全息图	104
4.3.4 白光全息图	105
4.3.5 彩虹全息图	107
4.3.6 全息电影摄影术	108
4.4 数字全息术	108
4.4.1 直接模拟	109
4.4.2 用方波模拟	115
4.5 全息干涉术	115
4.5.1 实时干涉测量	116
4.5.2 二次曝光方法	116
4.5.3 时间平均方法	117
4.6 全息干涉术理论	117
4.6.1 实时和二次曝光方法	117
4.6.2 时间平均方法	119
4.6.3 实时时间平均方法	121
第5章 激光散斑	123
5.1 强度统计学	124
5.2 散斑尺寸	126

5.3 散斑照相术	130
5.3.1 两次曝光技术	130
5.3.2 时间平均技术	135
5.4 散斑干涉术	138
5.5 流图	141
5.6 散斑图像相减	144
第6章 非线性光学	146
6.1 引言	146
6.2 二阶非线性光学	149
6.3 三阶非线性光学	155
6.3.1 光学克尔效应	155
6.3.2 二波混频	158
6.3.3 四波混频	159
6.4 非线性波方程	163
6.5 三波混频的耦合波理论	169
6.5.1 二次谐波的产生	171
6.5.2 频率转换	175
6.5.3 参量放大和参量振荡	176
6.6 四波混频的耦合波理论	178
第7章 光折变效应和光折变非线性光学	184
7.1 光折变效应	184
7.2 光折变晶体内的空间电荷场	186
7.3 光折变效应的带输运模型	191
7.4 光生伏打效应	198
7.4.1 光生伏打效应	198
7.4.2 光生伏打效应对空间电荷场的影响	200
7.5 相位光栅的非静态记录	203
7.5.1 直流场记录运动干涉条纹	204

7.5.2	外加交变电场记录不动干涉条纹	208
7.6	垂直场几何配置下的空间电荷场	210
7.7	光折变体相位栅	216
7.7.1	LiNbO_3 光折变晶体中的光折变体相位栅	217
7.7.2	BaTiO_3 和 SBN 光折变晶体中的光折变体 相位栅	220
7.7.3	立方光折变晶体(GaAs , BSO)中的光折变 体相位栅	221
7.8	光折变晶体中简并二波混频	222
7.8.1	对称透射几何配置下的二波混频	224
7.8.2	对称反射几何配置下的二波混频	229
7.9	光学简并四波混频	232
7.9.1	未耗尽泵浦近似解	234
7.9.2	四波混频的精确解	238
7.10	光折变空间孤子	244
第 8 章	非线性光学材料	246
8.1	无机非线性光学材料	246
8.1.1	介电和铁电单晶	246
8.1.2	电光陶瓷	258
8.1.3	半导体材料	263
8.1.4	Kerr 材料: 玻璃	277
8.2	有机非线性光学材料	279
8.2.1	引言	279
8.2.2	有机单晶	284
8.2.3	高分子聚合物	286
8.2.4	LB 膜	288
8.2.5	液晶	290
8.2.6	C_{60} (富氏烯)	293

8.3 半导体量子阱和超晶格	294
8.3.1 量子阱	297
8.3.2 多量子阱和超晶格	300
8.3.3 量子线和量子点	301
8.3.4 量子阱的光学性质	303
8.3.5 量子阱的电光效应	305
第9章 纤维光学	312
9.1 光纤的分类及其工作原理	312
9.1.1 按结构分类	313
9.1.2 按材料分类	315
9.2 光纤的色散	317
9.2.1 模式色散	317
9.2.2 材料色散	320
9.2.3 波导色散	320
9.3 衰减和损耗	321
9.3.1 吸收损耗	321
9.3.2 散射损耗	321
9.4 光纤传感器	323
9.4.1 光纤自身作为传感器	324
9.4.2 在光纤端面接传感器	324
9.4.3 光束传输与图像传输	325
9.4.4 光纤干涉仪	327
9.5 光纤通信	327
9.5.1 光源	329
9.5.2 探测器	330
9.5.3 调制	332
9.5.4 光纤的通带与信息量	334
9.5.5 波分复用 (WDM)	335

9.6 光学时间孤子	335
9.6.1 色散	336
9.6.2 非线性	339
第 10 章 导波光学和集成光学	343
10.1 介质波导	343
10.1.1 介质波导原理和平面波导	343
10.1.2 二维波导	348
10.1.3 波导的制作	349
10.1.4 激光与波导耦合的方式	355
10.2 集成光学	359
10.2.1 集成光路的优点	359
10.2.2 集成光路的分类	361
10.3 集成光路器件	362
10.3.1 棱镜、透镜和反射镜	362
10.3.2 激光器	366
10.3.3 波导耦合器和光开关	368
10.3.4 调制器	372
10.3.5 探测器	377
10.4 由光折变空间孤子写入并存储波导	378
10.4.1 概述	378
10.4.2 光折变空间孤子的主要类型及其特点	380
10.4.3 由光折变空间孤子写入波导的基本原理	381
10.4.4 由光折变空间孤子写入波导的方法	383
10.4.5 研究现状、发展前景及意义	386
10.5 光折变相位图和相位元件	387
10.5.1 基本原理	387
10.5.2 制作方法	388
10.5.3 应用前景	389

第 11 章 相干光学在生物医学和环境科学中的	
应用	391
11.1 全息相干术与散斑技术	391
11.1.1 生物体微小振动的测量	392
11.1.2 生物体微小畸变及表面形貌的检测	393
11.1.3 散斑全息干涉成像技术	394
11.1.4 内窥全息术	395
11.2 光纤传感技术在生命科学和环境科学中的应用	396
11.2.1 光纤传感技术在环境科学中的应用	396
11.2.2 光纤传感技术在生物医学中的应用	398
11.3 新型的生物光学成像技术	400
11.4 生物粒子的捕陷与操纵技术	403
11.5 生物相干光学材料	407

第 1 章 相干和干涉术

1.1 相干条件和对比度

干涉是相干波叠加而引起强度重新分布的现象。相干性则表明了相干波光场物理量之间的相关性质以及产生干涉的条件。两光波能够干涉的必要条件(相干条件)是:

- (1) 频率相同;
- (2) 存在相互平行的偏振分量;
- (3) 具有稳定的相位差。

这就是说,频率不同,偏振方向互相垂直,相位差不稳定的光波彼此之间不相干。干涉光强是相干光波的复振幅叠加后的光强。由于在两相干光波交叠的区域中不同位置处相干波之间的相位差不同,因而干涉光强也不同,所以相干波叠加会产生空间明暗相间的干涉条纹。而非相干光叠加则是强度叠加,总强度处处都等于各光波强度之和。因此,对于相干性最方便、直接的量度是干涉条纹的对比度(有时也称之为可见度,反衬度等),即干涉场中干涉条纹的清晰程度,它定义为^[1.1]

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1.1)$$

其中 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别是干涉场中光强的极大值和极小值。 K 可区分为以下三种情况:

$$\begin{aligned}
 K &= 1 && \text{完全相干,} \\
 K &< 1 && \text{部分相干,} \\
 K &= 0 && \text{完全不相干.}
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

相干效应可分为空间相干性和时间相干性。前者与光源的几何尺寸有关，后者则与光源的相干长度或单色性(带宽)有关。

迈克耳孙干涉仪为测量时间相干性提供了一种方便的技术；空间相干性则由杨氏双狭缝实验作出了最好的证明。

1.2 空间相干性与杨氏干涉仪

实际上许多光源都不是理想的点光源，而是有一定的几何尺度的扩展光源。它包含着众多的点光源，每一个点光源都产生彼此相互独立的一组干涉条纹。由于每个点光源的位置不同，因此它们产生的每组干涉条纹彼此间会发生位移。这样，在总干涉场的强度分布中暗条纹的强度便不再为零，因而使对比度下降。当光源尺度大到一定值时，一组的亮条纹会与另一组的暗条纹相重合，对比度可以下降为零，致使完全看不到干涉条纹。因此在做干涉实验时，必须考虑到光源中的不同位置处光波的干涉，也就是光源的几何尺寸对干涉条纹的影响，即空间相干性。杨氏双狭缝实验可以对空间相干性做出最好的解释。

在图 1.1 中的杨氏干涉装置中，假定轴上点 S 和轴外点 S' 为两个独立的点光源。当这两个点光源各自产生的干涉条纹彼此位移半个条纹间距时，屏上干涉条纹消失，总强度处处相等，表明扩展光源的几何尺度达到了空间相干性所要求的极限尺度，即光源的临界尺度 b_c 。

当点光源 S 向下移动到 S' 处时，零级干涉条纹从 O 点向上移至 P 点，位移为 δy 。显然，点光源位置移动引起的光程差 $\Delta L(P)$ 为

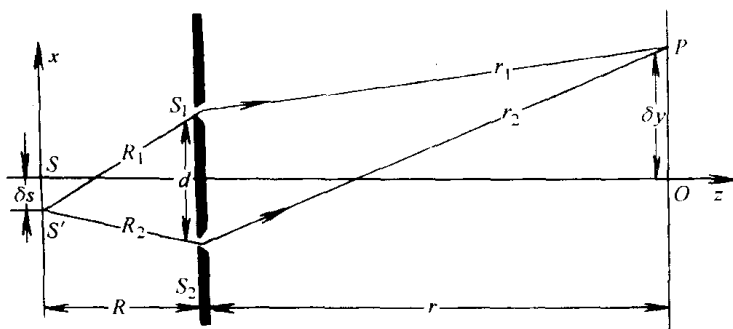


图 1.1 用杨氏干涉仪测量空间相干性

$$\Delta L(P) = R_1 + r_1 - R_2 - r_2 = 0 \quad (1.3)$$

$$R_1 - R_2 = r_2 - r_1 \quad (1.4)$$

表明点光源下移时，干涉条纹一定上移。在傍轴近似下^[1.2],

$$\left. \begin{aligned} \frac{r_2 - r_1}{d} &\simeq \frac{\delta y}{r}, & \frac{R_1 - R_2}{d} &\simeq \frac{\delta s}{R} \\ r_2 - r_1 &\simeq \frac{\delta y}{r} \cdot d, & R_1 - R_2 &\simeq \frac{\delta s}{R} \cdot d \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

由(1.4)和(1.5)式:

$$\delta y \simeq \frac{r}{R} \cdot \delta s \quad (1.6)$$

对点光源 S，通过杨氏装置在屏上形成的一组干涉条纹在光轴上 O 点处为零级($r_1 = r_2$ 对应 $R_1 = R_2$)。当 $r_2 - r_1 = \lambda$ 时，可求得在屏上干涉条纹间距 Δy :

$$\Delta y = \frac{\lambda}{d} \cdot r \quad (1.7)$$

利用(1.7)式可以从干涉条纹间隔 Δy 求得光波长。如果由于点光源移动 δs 使得屏上干涉条纹移动了半个条纹间距 $\frac{1}{2} \Delta y$ ，则两组干涉条纹强度相加的结果使屏上强度处处相等，则看不到干涉条纹，即对比度 K 为零或称完全不相干。此时相应的点光源移动距离 δs 为点光源移动极限 δs_l ，即

$$\delta s_l \simeq \frac{R}{r} \delta y = \frac{R}{r} \cdot \frac{1}{2} \Delta y = \frac{R}{r} \cdot \frac{\lambda}{2d} r = \frac{R\lambda}{2d} \quad (1.8)$$

因此, 空间相干条件为 $\frac{\delta s \cdot d}{R} < \frac{\lambda}{2}$ 。而实际光源为连续扩展光源, 并非只有两个点光源, 而是在两个边缘点光源之间连续分布着无穷多个点光源。显然, 在这种点光源连续分布的情况下, 边缘点光源产生的干涉条纹只彼此位移半个条纹间距 $\frac{1}{2} \Delta y$ 时, 屏上的合成强度仍有一定的对比度; 只有当 $\delta y = \Delta y$ 时, 对比度才会下降到零, 即干涉条纹完全消失。此时所对应的边缘点光源间距 $\delta s = b_c$, 即为空间相干性所要求的扩展光源尺寸的极限 (图 1.2)。光源的相干尺度为:

$$b_c \simeq \frac{R}{r} \Delta y = \frac{R}{r} \cdot \frac{\lambda}{d} r = \frac{R\lambda}{d} \quad (1.9)$$

设 d_c 为面光源的照明空间中波前上两个次波源 S_1 和 S_2 之间的相干距离, S_0 为 $\overline{S_1 S_2}$ 连线与光轴之交点, 则由上式得:

$$d_c \simeq \frac{R\lambda}{b_c} = \frac{\lambda}{b_c/R} = \frac{\lambda}{\theta} \quad (1.10)$$

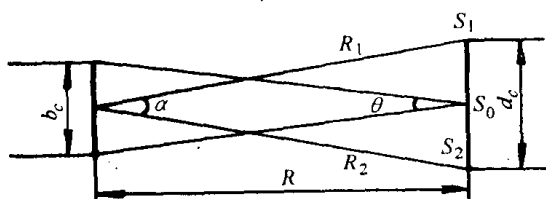


图 1.2 光源的相干尺度 b_c 、相干距离 d_c 之定义

θ 为 S_0 对扩展光源 b_c 之张角。如果扩展光源是正方形, 则被它照明的平面上的相干面积为

$$A_c = d_c^2 \simeq (\lambda/\theta)^2 \quad (1.11)$$

理论证明^[1.3], 对于圆形光源, 其照明平面上的横向相干宽度为

$$d_c = 1.22\lambda/\theta \quad (1.12)$$