



信息光学实验

杨文琴 主编



厦门大学出版社 国家一级出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位

杨文琴 主编

信息光学实验



厦门大学出版社 国家一级出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

信息光学实验/杨文琴主编. —厦门:厦门大学出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-5615-6037-2

I. ①信… II. ①杨… III. ①信息光学-实验 IV. ①O438

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 128769 号

出版人 蒋东明
责任编辑 李峰伟
封面设计 李嘉彬
责任印制 许克华

出版发行 厦门大学出版社
社 址 厦门市软件园二期望海路 39 号
邮政编码 361008
总 编 办 0592-2182177 0592-2181253(传真)
营销中心 0592-2184458 0592-2181365
网 址 <http://www.xmupress.com>
邮 箱 xmupress@126.com
印 刷 三明市华光印务有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16
印张 13
字数 316 千字
版次 2016 年 6 月第 1 版
印次 2016 年 6 月第 1 次印刷
定价 35.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换



厦门大学出版社
微信二维码



厦门大学出版社
微博二维码

内容提要

“信息光学实验”是高等学校光电信息类工程专业的一门核心实践课程。本书是为光电信息类工程专业而编撰,内容翔实,选材新颖,视觉独到,涵盖面广,包括光全息与数字全息,电光、声光、磁光调制,激光原理与调制,光电传感器,光纤器件与光通信,光纤光谱仪等 12 部分综合实验,可供“光电信息工程”“通信工程”“电子信息工程”“光学工程”等专业高年级本科生和研究生的实验课使用,也可供光信息技术领域的科技人员参考。

前 言

“信息光学实验”是高等学校光电信息类工程专业的一门核心实践课程。随着科学技术和信息光学学科的发展,现有信息光学实验教材出现了涵盖面窄、体系不完整等问题,为了进一步满足教学的需要,适应飞速发展的时代需求,编者组织编写了《信息光学实验》一书。本书物理概念和实验图表清晰,便于教学与自学。

本书具有选材新颖、视觉独到的特点,首先注重传统实验与前沿技术相结合,如在光学全息的基础上补充了数字全息;在传统的 He-Ne 激光器实验基础上加入磁光、声光、电光三光调制以及二极管泵浦的固体激光器;在光纤的各种性能测试以及光纤传输基础上增设了光纤放大、光纤熔接、光纤光谱应用等系列实验。其次实验项目的设置与企业的需求相结合,如 LED 快速光色电综合实验等。通过这些实验,学生对信息光学有了更完整的认识与体验。

本书是理工独立学院为光电信息类工程专业而编撰的专业课教材,内容翔实,涵盖面广,包括光全息与数字全息,电光、声光、磁光调制,激光原理与调制,光电传感器,光纤器件与光通信,光纤光谱仪等内容,可供“光电信息工程”“通信工程”“电子信息工程”“光学工程”等专业高年级本科生和研究生的实验课使用,也可供光信息技术领域的科技人员参考。

本书由黄彬彬、刘小建、吴荣琴、苏宝玺等根据信息光学理论与相关企业提供的资料加以整理,经过多年使用,再由常峻巍、刘巧玲、黄幼萍、陈彪等多次进行修改与校对,内容日臻完善。杨文琴主持了本实验教材的编写、整理、修改与校对,对编写的内容进行了统稿。感谢福建师范大学闽南科技学院对本书编写与出版的支持!感谢向本书提供资料的有关企业!

希望我们的工作能为理工科独立学院的发展做出贡献,但因水平有限,难免存在不妥之处,欢迎广大读者批评指正,以便再版时完善。

编 者

2016年3月于聚贤楼

目 录

数字全息综合实验	1
实验一 数字记录光学再现	1
实验二 光学记录数字再现	7
实验三 数字记录数字再现	11
激光全息综合实验	15
实验四 菲涅耳全息	15
实验五 白光再现全息(彩虹全息)	21
电光、声光、磁光效应综合实验	26
实验六 晶体的电光效应	26
实验七 晶体的声光效应	35
实验八 晶体的磁光效应	41
半导体泵浦固体激光器综合实验	44
实验九 固体激光器 $1.06\ \mu\text{m}$ 发射波长调试	44
实验十 固体激光器的被动调 Q 技术	49
实验十一 固体激光器的倍频技术	51
He-Ne 激光原理与技术综合实验	53
实验十二 He-Ne 激光器与扫描仪调节	53
实验十三 He-Ne 激光器模式分析	58
实验十四 外腔 He-Ne 激光器偏振态分析	61
光电传感器综合实验	65
实验十五 光度学量与辐射度学量	65
实验十六 PSD 位置传感器	70
实验十七 光栅位移传感器性能	73
实验十八 光敏电阻特性	75
实验十九 光纤温度传感系统特性	79
光纤器件与光通信原理实验	85
实验二十 光纤分类展示与制作	85
实验二十一 光纤端面处理与观察实验	88
实验二十二 光纤耦合及耦合效率测量实验	90
实验二十三 “截断法”测量光纤衰减及损耗实验	92
实验二十四 光纤数值孔径的测量实验	94
实验二十五 光纤衰减器衰减验证实验	97
实验二十六 可见光光纤的准直实验	99

实验二十七	光纤熔接实验	101
实验二十八	掺铒光纤放大器实验	105
光纤光谱仪应用综合实验		110
实验二十九	用反射光谱测定印刷品质量	111
实验三十	利用投射光谱测定滤光片透过率	121
实验三十一	利用等离子体光谱测定气体成分	124
实验三十二	利用白光干涉测定薄膜厚度	127
光纤通信综合实验		133
实验三十三	光纤线路接口码型 HDB3 编译码实验	140
实验三十四	数字调制原理实验	146
实验三十五	模拟信号光纤传输实验	152
实验三十六	数字信号光纤传输实验	156
实验三十七	电话光纤传输系统实验	159
实验三十八	语音+数据+图像光纤传输系统综合实验	162
实验三十九	多模光纤插入损耗测试实验	165
实验四十	单模光纤弯曲损耗测试实验	168
光电检测综合实验		171
实验四十一	光电倍增管特性参数的测试	171
CCD 原理及应用实验		176
实验四十二	CCD 驱动测试实验	176
实验四十三	CCD 特性测试实验	184
实验四十四	CCD 输出信号的二值化处理实验	186
实验四十五	线阵 CCD 的 AD 数据采集	187
实验四十六	线阵 CCD 软件二值化及物体宽度的测量	189
LED 快速光色电综合实验		192
实验四十七	LED 仪器原理及特性	192
参考文献		199

数字全息综合实验

实验一 数字记录光学再现

【实验目的】

- (1)通过本实验掌握数字全息术的原理和实验方法。
- (2)通过本实验熟悉空间光调制器(spatial light modulator, SLM)的工作原理和调制特性。
- (3)通过本实验掌握空间光调制器在光学再现上的应用。

【实验仪器】

DH-NH250P He-Ne 激光器、可调光阑、DH-HC CMOS 数字相机、HG-LCD-11 空间光调制器、分光光楔、空间滤波器、可调衰减片、反射镜、计算机等。

【实验原理】

全息术利用光的干涉原理,将物体发射的光波波前以干涉条纹的形式记录下来,达到冻结物光波相位信息的目的;利用光的衍射原理再现所记录物光波的波前,就能够得到物体的振幅(强度)和相位(包括位置、形状和色彩)信息,在光学检测和三维成像领域具有独特的优势。由于传统全息是用卤化银、重铬酸盐明胶(DCG)、光致抗蚀剂等材料记录全息图,记录过程烦琐(化学湿处理)且费时,限制了其在实际测量中的广泛应用。

数字全息术是由 Goodman 和 Lawrence 在 1967 年提出的,其基本原理是用光敏电子成像器件代替传统全息记录材料记录全息图,用计算机模拟再现取代光学衍射来实现所记录波前的数字再现,实现了全息记录、存储和再现全过程的数字化,给全息术的发展和應用增加了新的内容和方法。目前常用的光敏电子成像器件主要有电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)、互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)传感器和电荷注入器件(charge-injection detector, CID)三类。

数字全息术的波前记录和数值重现过程可分为三部分:

- (1)数字全息图的获取。将参考光和物光的干涉图样直接投射到光电探测器上,经图像采集卡获得物体的数字全息图,将其传输并存储在计算机内。
- (2)数字全息图的数值重现。本部分完全在计算机上进行,需要模拟光学衍射的传播过

程,一般需要数字图像处理和离散傅立叶变换的相关理论,这是数字全息术的核心部分。

(3) 重现图像的显示及分析。输出重现图像并给出相关的实验结果及分析。

与传统光学全息术相比,数字全息术的最大优点是:①由于用 CCD 等图像传感器记录数字全息图的时间,比用传统全息记录材料记录全息图所需的曝光时间短得多,因此它能够用来记录运动物体的各个瞬间状态,其不仅没有烦琐的化学湿处理过程,而且记录和再现过程都比传统光学全息方便快捷;②由于数字全息可以直接得到记录物体再现像的复振幅分布,不是光强分布,而被记录物体的表面亮度和轮廓分布都可通过复振幅得到,因此可方便地用于实现多种测量;③由于数字全息采用计算机数字再现,可以方便地对所记录的数字全息图进行图像处理,减少或消除在全息图记录过程中的像差、噪声、畸变及记录过程中 CCD 器件非线性等因数的影响,因此便于进行测量对象的定量测量和分析。

1. 数字全息记录和再现的基本理论

数字全息的记录原理和光学全息一样,只是在记录时用 CCD 来代替全息干板,将全息图储存到计算机内,用计算机程序取代光学衍射来实现所记录物场的数值重现。整个过程不需要在暗室中进行显影、定影等物理化学过程,真正实现了全息图记录、存储、重现和处理全过程的数字化。

下面对数字全息的光路进行分析。

由于数字全息是使用 CCD 代替全息干板来记录全息图的,因此想要获得高质量的数字全息图,并完好地重现出物光波,必须保证全息图表面上的光波的空间频率与记录介质的空间频率之间的关系满足奈奎斯特采样定理,即记录介质的空间频率必须是全息图表面上光波的空间频率的两倍以上。但是,由于 CCD 的分辨率(约 100 线/mm)比全息干板等传统记录介质的分辨率(达到 5 000 线/mm)低得多,而且 CCD 的靶面面积很小,因此数字全息的记录条件不容易满足,记录结构的考虑也有别于传统全息。目前数字全息术仅限于记录和重现较小物体的低频信息,且对记录条件有其自身的要求,因此要想成功地记录数字全息图,就必须合理地设计实验光路。

设物光和参考光在全息图表面上的最大夹角为 θ_{\max} ,则 CCD 平面上形成的最小条纹间距 Δe_{\min} 为

$$\Delta e_{\min} = \frac{\lambda}{2\sin(\theta_{\max}/2)} \quad (1.1)$$

所以全息图表面上光波的最大空间频率为

$$f_{\max} = \frac{2\sin(\theta_{\max}/2)}{\lambda} \quad (1.2)$$

一个给定的 CCD 像素大小为 Δx ,根据采样定理,一个条纹周期 Δe 要至少等于两个像素周期,即 $\Delta e \geq 2\Delta x$,记录的信息才不会失真。由于在数字全息的记录光路中,所允许的物光和参考光的夹角 θ 很小,因此 $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$,则

$$\theta \leq \frac{\lambda}{2\Delta x} \quad (1.3)$$

所以

$$\theta_{\max} = \frac{\lambda}{2\Delta x} \quad (1.4)$$

在数字全息图的记录光路中,参考光与物光的夹角范围受到 CCD 分辨率的限制。由于现有的 CCD 分辨率比较低,因此只有尽可能地减小参考光和物光之间的夹角,才能保证携带物体信息的物光中的振幅和相位信息被全息图完整地记录下来。由于 CCD 像素的尺寸一般在 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 范围内,故所能记录的最大物参角在 $2^\circ\sim 4^\circ$ 范围内。

只要采样定理满足,参考光可以是任何形式的,可以使用准直光或是发散光,可以水平入射到 CCD 或是以一定的角度入射。

与传统全息记录材料相比,一方面,由于记录数字全息的 CCD 靶面尺寸小,仅适应于小物体的记录,另一方面,目前数字记录全息图的 CCD 像素尺寸大,分辨率低,使记录的物参光夹角小,因此只能记录物体空间频谱中的低频部分,导致重现像的分辨率低,像质较差。

综上,在数字全息中要想获得较好的重现效果,需要综合考虑实验参数,合理地设计实验光路。

2. 空间光调制器在光学再现上的应用

数字全息一开始的定义是指用电荷耦合成像器件代替普通照相干板来记录全息图,用数字计算方法再现;后来,数字全息的范围扩大到计算机制全息图,光电子再现全息图等,形成了更广义的数字全息。数字全息术从记录过程来看,可以分为计算机制全息和像素全息两种;从再现过程分,又可以分为计算机再现和光电子再现两种。几种方法互相交叉,目前数字全息的几种实现方式如图 1.1 所示。

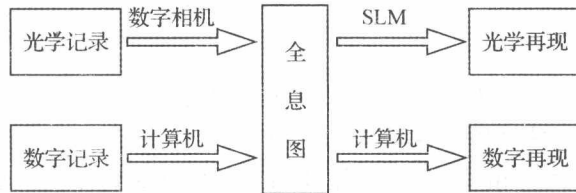


图 1.1 数字全息的实现方式

(1) 空间光调制器的简介。

前面我们已经详细阐述了数字全息在光学记录上与传统全息术在记录介质上的区别,下面重点介绍广义数字全息在光学再现方面的发展与革新。在全息术发展的很长一段时间里,人们都是通过全息干板来记录全息干涉图样的,需要经过曝光、显影、定影等化学处理,过程费时且复杂,最大的缺陷是干板的不可重复性,一块干板无法实现多幅图像的转换显示;即便是在计算机制全息图术出现后的很长一段时间内,也需要用绘图仪或激光光束扫描记录装置等设备将计算结果制作成全息图进行再现,无法实时显示的缺陷仍然存在。这时候,空间光调制器出现在了全息研究者的视线里。液晶空间光调制器是一种新兴的全息图的载体,与传统的全息记录介质相比,它具有计算机接口、操作方便、可实时显示等优点。但是,由于自身的结构特点和制作工艺的限制,液晶空间光调制器在全息再现系统中的应用也具有传统介质所没有的特殊性。

空间光调制器是一类能将信息加载于一维或二维的光学数据场上,以便有效地利用光的固有速度,具有并行性和互连能力的器件。这类器件可在随时间变化的电驱动信号或其他信号的控制下,改变空间上光分布的振幅或强度、相位、偏振态以及波长,或者把非相干光转化成相干光。它由于具有这种性质,因此可作为实时光学信息处理、光计算等系统中的构

造单元或关键器件。空间光调制器是实时光学信息处理、自适应光学和光计算等现代光学领域的关键器件。空间光调制器一般按照读出光的读出方式不同,可以分为反射式和透射式;而按照输入控制信号的方式不同,又可分为光寻址(Optically addressed SLM, OA-SLM)和电寻址(electrically addressed SLM, EA-SLM)。最常见的空间光调制器是液晶空间光调制器,应用光-光直接转换,效率高、能耗低、速度快、质量好,可广泛应用到光计算、模式识别、信息处理、显示等领域,具有广阔的应用前景。

想定量分析液晶屏对光的调制特性,需要将调制过程用数学方法来模拟。液晶盒里的扭曲向列液晶可沿光的透过方向分层,每一层可看作是单轴晶体,它的光学轴与液晶分子的取向平行。由于分子的扭曲结构,因此分子在各层间按螺旋方式逐渐旋转,各层单轴晶体的光学轴沿光的传输方向也螺旋式旋转,如图 1.2 所示。

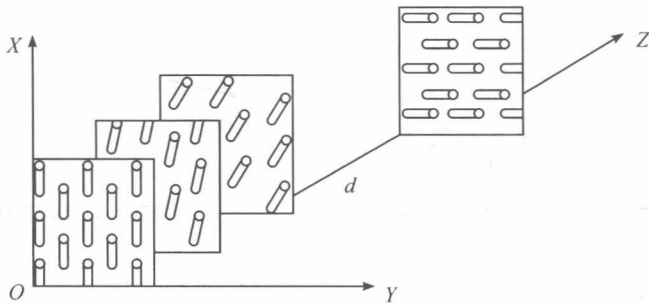


图 1.2 TNLC 分层模型

在空间光调制器液晶屏的使用中,光线依次通过起偏器 P_1 、液晶分子、检偏器 P_2 ,如图 1.3 所示。光路中要求偏振片和液晶屏表面都在 $x-y$ 平面上,图中已经分别标出了液晶屏前后表面分子的取向,两者相差 90° 。偏振片角度的定义是,逆着光的方向看, ϕ_1 为液晶屏前表面分子的方向顺时针到 P_1 偏振方向的角度, ϕ_2 为液晶屏后表面分子的方向逆时针到 P_2 偏振方向的角度。偏振光沿 z 轴传输,各层分子可以看作是具有相同性质的单轴晶体,它的 Jones 矩阵表达式与液晶分子的寻常折射率 n_o 和非常折射率 n_e ,以及液晶盒的厚度 d 和扭曲角 α 有关。除此之外, Jones 矩阵还与两个偏振片的转角 ϕ_1, ϕ_2 有关。因此光波强度和相位的信息可简单表示为 $T = T(\beta, \phi_1, \phi_2), \delta = \delta(\beta, \phi_1, \phi_2)$,其中 $\beta = \pi d [n_e(\theta) - n_o] / \lambda$ 又称为双折射,它其实为隐含电场的量。因为 β 为非常折射率 n_e 的函数,非常折射率 n_e 随液晶分子的倾角 θ 改变, θ 又随外加电压而变化。

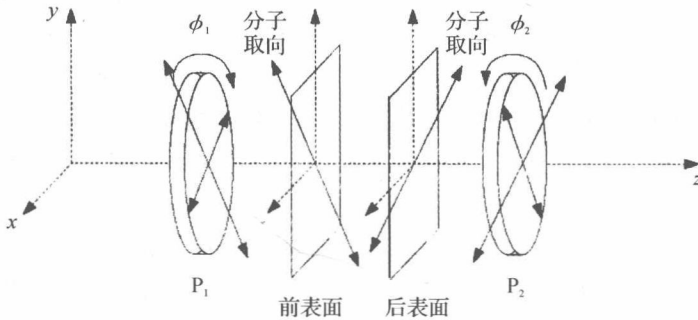


图 1.3 SLM 光路

目前主流的液晶显示器组成比较复杂,主要由荧光管、导光板、偏光板、滤光板、玻璃基板、配向膜、液晶材料、薄膜式晶体管等组成。它作为空间光调制器来使用时,通常只保留液晶材料和偏振片。液晶被夹在两个偏振片之间,就能实现显示功能。光线入射面的称为起偏器,出射面的称为检偏器。实验时通常将这两个偏振片从液晶屏中分离出来,取而代之的是可旋转的偏振片,这样方便调节角度。

(2)振幅型空间光调制器作为再现干板的工作原理。

在全息记录的过程中,当来自物体表面的散射光与参考光照射在全息记录板上时,参考光波与物光波进行叠加,叠加后形成的干涉条纹图记录在全息记录板上。由于记录板上记录的是曝光期间内再现波前的平均能量,也就是说记录板记录的仅仅是再现波的光强。全息记录板的作用相当于一个线性变换器,它把曝光期间内的入射光强线性地变换为显影后负片的振幅透过率。全息像的再现,只要将上述全息记录板用原参考光束照明,就可得到物体的像。在再现的过程中,全息图将照射的光衍射成波前,这个衍射波就产生表征原始波前的所有光学现象。

振幅型空间光调制器是通过对入射线偏振光进行调制后改变其偏振态,利用入射和出射偏振片的不同获得不同强度的出射偏振光的,因此通过设置振幅型空间光调制器不同像素位置的灰度值,就可以改变对应位置出射光的光强。基于此,可以用振幅型空间光调制器来代替再现干板,将记录时的复振幅透过率关系写入空间光调制器的液晶,当参考光被调制后,便可衍射生成被记录的物光信息。

利用空间光调制器来代替传统的全息干板,可以实现传统全息实验中无法实现的实时全息再现功能。但由于液晶空间光调制器的有限空间分辨率,全息记录的条件受到限制,在利用空间光调制器实现全息再现的系统中,记录时参考光角度不能大于由液晶屏分辨率决定的最大值,物体和全息面距离、物体尺寸都有相应较高的要求。同时考虑再现衍射像分离、提高系统分辨率等因素,上述参数的选取被限定在一定范围内,以保证获得较高质量的全息像。

【实验步骤】

本实验中,通过软件生成全息图,然后读入空间光调制器中,用空间光调制器代替传统光学全息中的再现介质。其实验光路如图 1.4 所示。

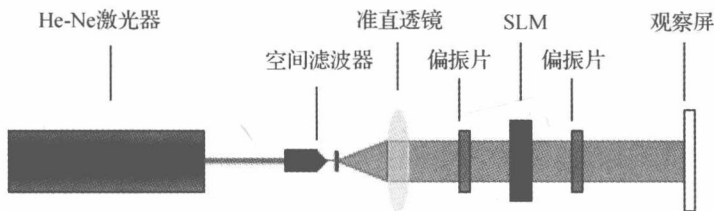


图 1.4 利用 SLM 进行数字全息再现的光路

- (1) 点击“读图”加载物体信息,物体图片尺寸不要超过 1024×1024 。
- (2) 设置记录时的虚拟光路的参数、衍射距离及参考光夹角;点击生成全息图,观察数字全息图。
- (3) 按照光路图搭建好实验光路,将 SLM 与计算机连接;点击软件中的“输出 SLM”将

生成的数字全息图写入 SLM 中。

(4) 将观察屏放置到对应的再现位置, 调节偏振片的角度和 SLM 与光路的夹角, 直到观察屏观察到最好的再现效果。

(5) 在实验过程中调节空间光调制器前后偏振片的角度, 使空间光调制器处于强度调制状态(空间光调制器不会对再现像的相位进行大的改变), 提高再现像的对比度。

【注意事项】

(1) 用可调衰减片调节物光与参考光的光强比, 增强干涉条纹的对比度。

(2) 物光和参考光的夹角要控制在最大夹角内(通过采集图像的干涉条纹间距来调整物参光的夹角)以保证物光和参考光的干涉场在被 CCD 记录时, 满足奈奎斯特采样定理, 否则在进行重现时, 重现像将会失真甚至导致实验失败。

(3) 在通过软件重现的过程中, 分别进行不做任何处理的重现和对采集的全息图做频率滤波之后再重现, 发现采用频率滤波的方法能够同时消除零级亮斑和共轭像, 使再现像的质量得到明显的改善; 在做频率滤波的时候要根据采集到的全息图选择合适的滤波窗口, 以便准确地选取出物光信息。

【思考题】

(1) 与传统的光学全息术相比, 数字全息术具有哪些优点?

(2) 当生成的全息图对比度不够时, 可怎样进行调节?

(3) 滤波器中加入针孔的目的是什么? 与没加针孔相比较, 全息图有什么差别?

实验二 光学记录数字再现

【实验目的】

通过本实验熟悉空间光调制器的工作原理和调制特性。

【实验仪器】

DH-NH250P He-Ne 激光器、可调光阑、DH-HC CMOS 数字相机、HG-LCD-11 空间光调制器、分光光楔、空间滤波器、可调衰减片、反射镜、计算机等。

【实验原理】

1. 数字全息记录和再现算法

图 2.1 给出了数字全息图记录和重现结构及坐标系示意图。物体位于 xOy 平面上与全息平面 $x_H O_H y_H$ 相距 d ，即全息图的记录距离，物体的复振幅分布为 $u(x, y)$ 。CCD 位于 $x_H O_H y_H$ 面上， $i_H(x_H, y_H)$ 是物光和参考光在全息平面上的干涉光强分布。 $x'O'y'$ 面是数值重现的成像平面，与全息平面相距 d' ，也称为重现距离。 $u(x', y')$ 是重现像的复振幅分布，因为它是一个二维复数矩阵，所以可以同时得到重现像的强度和相位分布。

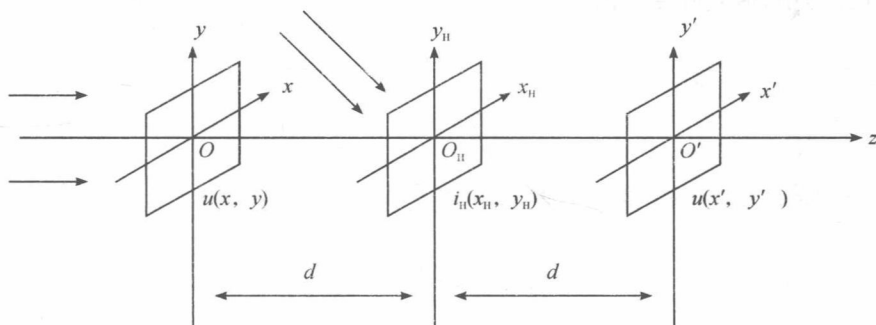


图 2.1 数字全息图记录和重现结构及坐标系

对于图 2.1 的坐标关系，根据菲涅耳衍射公式可以得到物光波在全息平面上的衍射光场分布 $O(x_H, y_H)$ 为

$$O(x_H, y_H) = \frac{e^{jk d}}{j\lambda d} \iint u(x, y) \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(x - x_H)^2 + (y - y_H)^2]\right\} dx dy \quad (2.1)$$

式中， λ 为波长； $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数。

全息平面上，设参考光波的分布为 $R(x_H, y_H)$ ，则全息平面的光强分布 $i_H(x_H, y_H)$ 为

$$i_H(x_H, y_H) = [O(x_H, y_H) + R(x_H, y_H)] \cdot [O(x_H, y_H) + R(x_H, y_H)]^* \quad (2.2)$$

其中上角标 * 代表复共轭。用于参考光波相同的重现光波 $R(x_H, y_H)$ 全息图时，全息图后

的光场分布为 $i_H(x_H, y_H) \cdot R(x_H, y_H)$ 。

在满足菲涅耳衍射的条件下,重现距离为 d' 时,成像平面上的光场分布 $u(x', y')$ 为

$$u(x', y') = \frac{e^{jkd'}}{j\lambda d'} \iint i_H(x_H, y_H) R(x_H, y_H) \exp\left\{ \frac{jk}{2d'} \left[(x' - x_H)^2 + (y' - y_H)^2 \right] \right\} dx_H dy_H \quad (2.3)$$

将式(2.3)中的二次相位因子 $(x' - x_H)^2 + (y' - y_H)^2$ 展开,则式(2.3)可写为

$$u(x', y') = \frac{e^{jkd'}}{j\lambda d'} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d'} (x'^2 + y'^2) \right] \iint i_H(x_H, y_H) R(x_H, y_H) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d'} (x_H^2 + y_H^2) \right] \times \exp\left[-j2\pi \frac{1}{\lambda d'} (x_H x' + y_H y') \right] dx_H dy_H \quad (2.4)$$

在数字全息中,为了获得清晰的重现像, d' 必须等于 d (或者 $-d$), 当 $d' = -d < 0$ 时,原始像在焦,重现像的复振幅分布为

$$u(x', y') = -\frac{e^{jkd}}{j\lambda d} \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d} (x'^2 + y'^2) \right] \times F^{-1} \left\{ i_H(x_H, y_H) R(x_H, y_H) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d} (x_H^2 + y_H^2) \right] \right\} \quad (2.5)$$

同理,当 $d' = d > 0$ 时,共轭像在焦,重现像的复振幅分布为

$$u(x', y') = \frac{e^{jkd}}{j\lambda d} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d} (x'^2 + y'^2) \right] \times F^{-1} \left\{ i_H(x_H, y_H) R(x_H, y_H) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d} (x_H^2 + y_H^2) \right] \right\} \quad (2.6)$$

这样,利用傅立叶变换就可以求出重现像,这也是称之为傅立叶变换算法的原因。在式(2.5)和式(2.6)中,傅立叶变换的频率为

$$\begin{cases} f_x = \frac{x'}{\lambda d} \\ f_y = \frac{y'}{\lambda d} \end{cases} \quad (2.7)$$

根据频域采样间隔和空域采样间隔之间的关系,可得

$$\begin{cases} \Delta f_x = \frac{1}{M \Delta x_H} \\ \Delta f_y = \frac{1}{N \Delta y_H} \end{cases} \quad (2.8)$$

式中, M 和 N 分别为两个方向的采样点个数。所以,全息平面的像素大小和重现像面的像素大小之间的关系为

$$\begin{cases} \Delta x' = \frac{\lambda d}{M \Delta x_H} \\ \Delta y' = \frac{\lambda d}{N \Delta y_H} \end{cases} \quad (2.9)$$

式(2.9)表明,重现像的像素大小和重现距离 d 成正比,重现距离越大, $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 就越大,分辨率就越低。在数值重现的整个计算过程中,数字图像的像素总数是保持不变的,因此,重现像的整体尺寸也与重现距离有关,随着重现距离的增大而增大。

如果利用数字图像处理方法对全息图 $i_H(x_H, y_H)$ 进行预处理,然后再进行重现,则可以消除重现像中零级亮斑以及共轭像(或原始像)离焦所带来的影响。

【实验步骤】

(1)本实验用 COMS 相机代替传统全息中的干板作为记录介质,再在计算机中进行。实验光路图如图 2.2 所示。

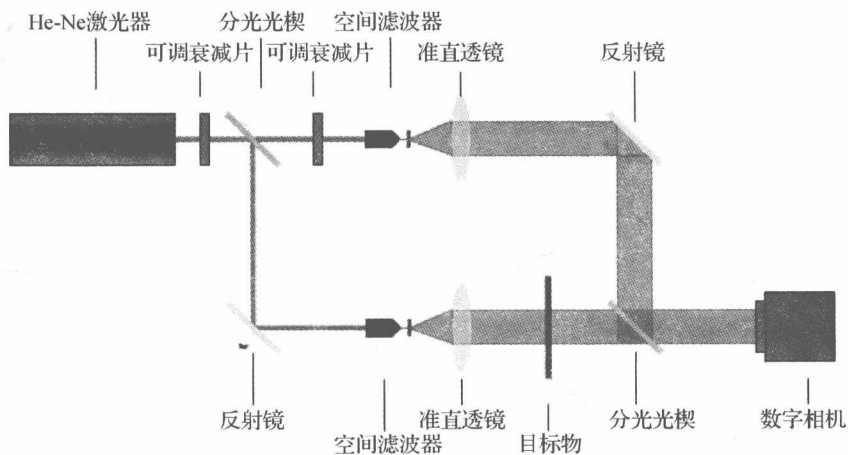


图 2.2 透射物体的数字全息记录光路

(2)按照实验光路图从激光器开始逐个摆放各个实验器件,确保光路水平,光学器件同轴。目标物和 CMOS 数字相机先不加入光路中。

(3)光路调节:在光路搭建完后,调节两路光,使其合成一束同轴光,能够出现同心圆环干涉条纹,此时可认为光路初步调节基本完成。

(4)旋转激光器出口的可调衰减片,将整个系统中的光强调到最弱,再将数字相机加入系统中,实时记录干涉条纹图案,然后调整可调衰减片使相机采集到干涉条纹光强合适,不能曝光过度。

(5)调节分光光楔处的调整架,让两束光有轻微的夹角,能够产生离轴全息,方便后期再现。图像上显示较为密集的竖条纹。

(6)将目标物加入光路中,调节第二个可调衰减片,参考光光强适当,使得物光和参考光光强相差不大。

(7)采集全息图案,用软件中“频域分析”来观测频域中的 ± 1 级是否和 0 级分开,如果未分开,需继续调整参考光和物光的夹角,直到 ± 1 级和 0 级充分分开。

(8)在软件“频谱分析”界面中,点击频谱图 $+1$ 级的峰值位置,获取坐标,将 x 轴坐标填入右边“峰值点”输入框;输入合适的滤波窗口大小值;测量目标物和数字相机之间的距离,输入“再现距离”处,点击数字再现,便可得到数字再现的全息图。

【注意事项】

(1)用可调衰减片调节物光与参考光的光强比,增强干涉条纹的对比度。

(2)物光和参考光的角度要控制在最大夹角内(通过采集图像的干涉条纹间距来调整物