

光学空间滤波及光信息处理技术

空间滤波指在光学系统的傅里叶频谱面上放置适当的滤波器,以改变光波的频谱结构,使得像达到预期要求。在此基础上,发展了光学信息处理技术,利用光学手段,对输入信息(包括图像、光波频率和振幅)实施运算或变换,以便对相关信息进行提取、编码、存储、增强、识别和恢复。早在1873年,德国人阿贝(E. Abbe,1840~1905)在蔡司光学公司任职期间研究如何提高显微镜的分辨本领时,首次提出了二次衍射成像的理论。阿贝和波特(A.B. Porter)分别于1893年和1906年以一系列实验证实了这一理论,说明了成像质量与系统传递的空间频谱之间的关系。1935年,泽尼可(Zernike)提出了相衬显微镜的原理,将物光的位相分布转化为光强分布,并用光学方法实现图像处理。这些早期的理论和实验其本质上都是一种空间滤波技术,是傅里叶光学的萌芽,为近代光学信息处理提供了深刻的启示。但由于它属于相干光学的范畴,在激光出现以前很难将它在实际中推广使用。随着激光器、光电技术和全息技术的发展,它才重新振兴起来,其相应的基础理论——“傅里叶光学”形成了一个新的光学分支。目前,光学信息处理在信息存储、遥感、医疗、产品质量检测等方面得到了广泛应用。

一、实验目的

1. 了解傅里叶光学基本理论的物理意义,加深对光学空间频率、空间频谱和空间频率滤波等概念的理解。
2. 掌握在一张全息干版上按照不同的角度制作全息光栅的方法。
3. 理解 θ 调制法假彩色编码原理,并学习利用光栅的色散作用,在频谱面上使相应的色谱点通过,形成彩色像。

二、实验仪器

光学实验平台, He-Ne 激光器, 分束镜, 反射镜, 暗室处理器具及显影、定影、漂白药剂, 电吹风, 全息干版、白炽灯、凸透镜、频谱滤波器、大头针

1. He-Ne 激光发射器

氦-氖激光器由激光电源和激光发射管构成,如图 1 所示。一般来说,氦氖激光器发出红色的光线,其波长为 632.8nm。

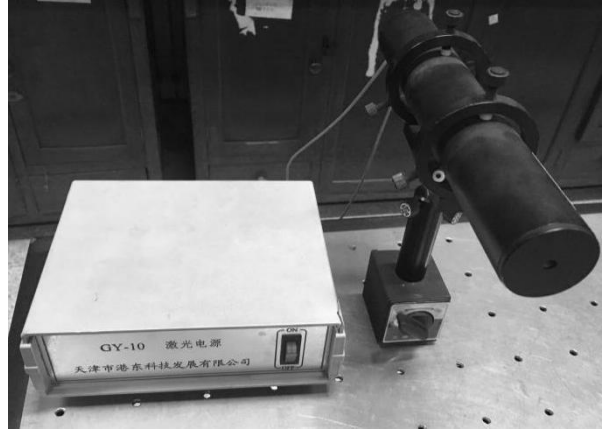
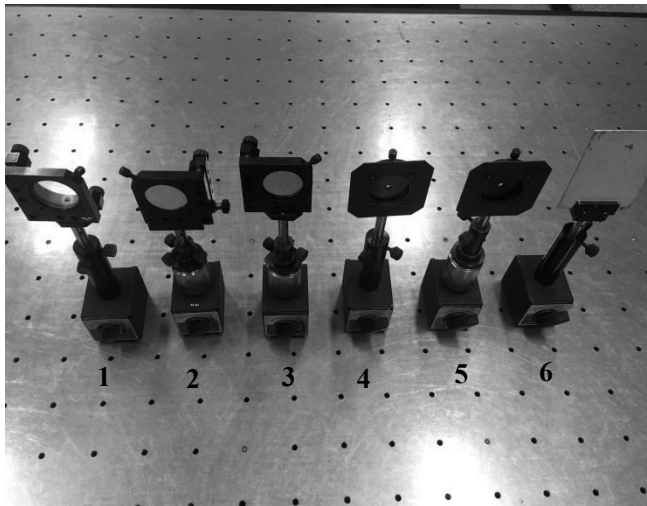


图1 氦-氖激光器

2. 光学元件



- 1 — 分束镜
- 2,3 — 反射镜
- 4,5 — 扩束镜
- 6 — 白板（全息干版）

图2 光学元件

三、实验原理

1. 阿贝成像原理

设有一个空间二维函数 $g(x, y)$ ，其二维傅里叶变换为

$$G(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-i2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy \quad (1)$$

式中 ξ, η 分别为 x, y 方向的空间频率，而 $g(x, y)$ 则为 $G(\xi, \eta)$ 的傅里叶逆变换，即

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi, \eta) \exp[i2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta \quad (2)$$

式（2）表示，任意一个空间函数 $g(x, y)$ 可表示为无穷多个基元函数 $\exp[i2\pi(\xi x + \eta y)]$ 的线性迭加， $G(\xi, \eta)$ 是相应于空间频率为 ξ, η 的基元函数的权

重， $G(\xi, \eta)$ 称为 $g(x, y)$ 的空间频谱。

用光学方法可以很方便地实现二维图像的傅里叶变换，获得它的空间频谱。由透镜的傅里叶变换性质可知，只要在傅里变换透镜的前焦面上放置一透射率为 $g(x, y)$ 的图像，并以相干平行光束垂直照射，则在透镜后焦面上的光场分布就是 $g(x, y)$ 的傅里叶变换 $G(\xi, \eta)$ ，即空间频谱 $G[x'/(\lambda f), y'/(\lambda f)]$ 。其中 λ 为光波波长， f 为透镜的焦距， (x', y') 为后焦面（即频谱面）上任意一点的位置坐标。显然，后焦面上任意一点 (x', y') 对应的空间频率为 $\xi = x'/(\lambda f)$ ， $\eta = y'/(\lambda f)$ 。

傅里叶变换光学在光学成像中的重要性，首先在显微镜的研究中显示出来。1873 年，阿贝提出了相干光照明下显微镜的成像原理。他认为在相干平行光照明下，显微镜的成像过程可以分成二步。第一步是通过物的衍射光在透镜的后焦面（即频谱面）上形成空间频谱，这是衍射所引起的“分频”作用；第二步是代表不同空间频率的各光束在像平面上相干迭加而形成物体的像，这是干涉所引起的“合成”作用，如图 3 所示。

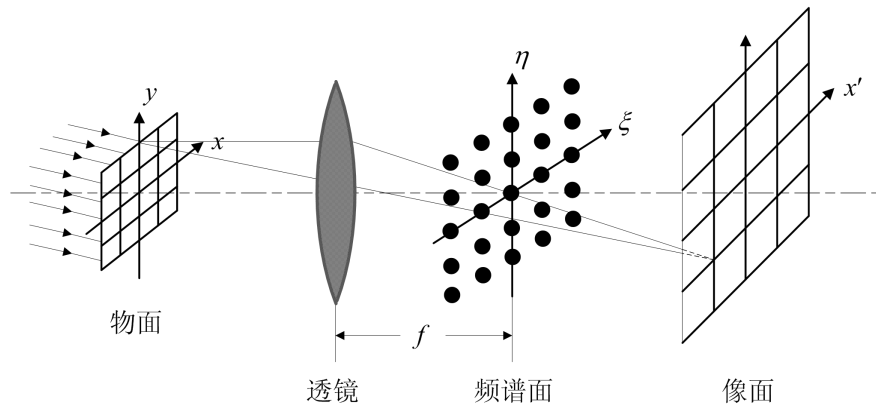


图 3 阿贝成像原理

成像的这两个过程，本质上就是两次傅里叶变换。第一个过程把物面光场的空间分布 $g(x, y)$ 变为频谱面上空间频率分布 $G(\xi, \eta)$ ，第二个过程则是将频谱面上的空间频谱分布 $G(\xi, \eta)$ 作傅里叶逆变换还原为空间分布（即将各频谱分量复合成像）。因此，成像过程经历了从空间域到频率域，又从频率域到空间域的两变换过程。如果两次变换是理想的，即信息没有损失，则像和物应完全相似（除了放大或缩小）。但一般说来，像和物不可能完全相似，这是由于透镜的孔径有

限，总有一部分衍射角度大的高次成分（高频信息）不能进入到物镜而被丢弃，所以像的信息总是比物的信息要少一些，像和物不可能完全一样。由于高频信息主要反映物的细节，因此当高频信息受到孔径的阻挡而不能到达像平面时，无论显微镜有多大放大倍数，也不可能在像平面上分辨这些细节，这是显微镜分辨率受到限制的本质原因。当物的结构非常精细（如很密的光栅）或物镜孔径非常小时，有可能只有零级衍射（空间频率为零）能通过，则在像平面上虽有光照，却完全不能形成图像。

2. 空间滤波

由以上讨论可知，成像过程本质上是两次傅里叶变换，即从空间复振幅分布函数 $g(x, y)$ 变为频谱函数 $G(\xi, \eta)$ ，再由频谱函数 $G(\xi, \eta)$ 变回到空间函数 $g(x, y)$ （忽略放大率）。因此，在频谱面（即透镜后焦面）上人为地放一些模板（吸收板或相移板）以减弱某些空间频率成份或改变某些频率成分的相位，便可使像面上的图像发生相应的变化，这样的图像处理称为空间滤波。频谱面上这种模板称为滤波器，常见的滤波器是一些特殊形状的光阑，如图 4 所示。



图 4 不同类型的空间滤波器

图 2 中 (a) 为高通滤波器，它是一个中心部分不透光的光屏，它能滤去低频成分而允许高频成分通过，可用于突出像的边沿部分或者实现像的衬度反转；(b) 为低通滤波器，其作用是滤掉高频成分，仅让靠近零频的低频成分通过。它可用于滤掉高频噪声，例如滤去网板照片中的网状结构；(c) 为带通滤波器，它可以让一些需要的频谱分量通过，其余被滤掉，可用于消除噪音；(d) 为方向滤波器，可用于去除一些方向的频谱或仅让给定方向的频谱通过，用于突出图像的一定特征。

3. θ 调制法假彩色编码

θ 调制采用不同取向的光栅对物屏面的各部分进行调制（编码），通过特殊

滤波器控制像平面相关各部分的灰度（用单色光照明）或色彩（用白光照明）的一种方法。实验采用的 θ 调制板附件是一个由三种取向的光栅组成的图案，相邻取向的夹角均为 120° 。在图5所示光路中，从卤钨灯发出的光通过凸透镜 L_1 （焦距为190 mm）变成近似平行光束，其中每一种单色光通过图案的各组成部分，都会在 L_2 的后焦面上产生与各部分对应的频谱，其排列方向垂直于光栅栅线的方向。合成的结果，中央零级形成白色光斑，其他各级形成三个方向的彩色光斑。此时，将夹紧白纸的纸板架放在频谱面上，先用大头针扎一个小孔，测定各排频谱所属图案区域。接着，避开测试孔，按配色需要，在相关色斑的单色部位尽可能准确地扎出一些小孔，在毛玻璃屏上就得到预期的彩色图案。

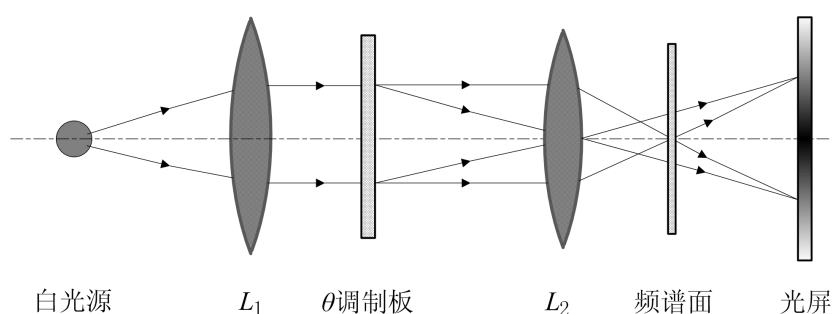


图5 θ 调制光路图

四、实验内容

1. 全息光栅的制作

(1) 按图6的示意图布置光路，调节激光束与各个光学元件中心平行。制作实例如图7所示。

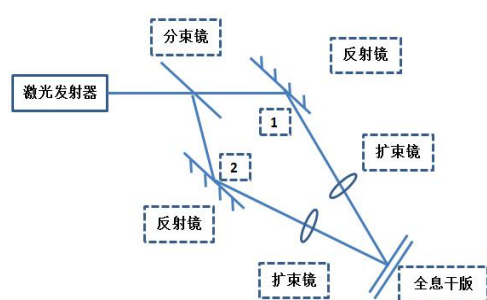


图6 全息光栅制作示意图



图7 全息光栅制作实例图

调节分束镜的角度和两个反射镜的位置，使光路1和光路2之间的光程大致相等。同时，分了使两个光路的光强也大致相等，光路1所在光路的扩束镜距离全息干版的位置较远，而光路2所在光路的扩束镜距离全息干版较近。另外，光路1和光路2之间的夹角宜小于 15° 。

(2) 布置好光路后，在黑暗条件下进行曝光，曝光时间 40 秒，曝光 3 次。需要注意的是，每次曝光需要将一个纸片放置于激光和全息干版之间（只让纸片镂空的部分曝光，纸片编号为 1，2，3），如图 8 所示。

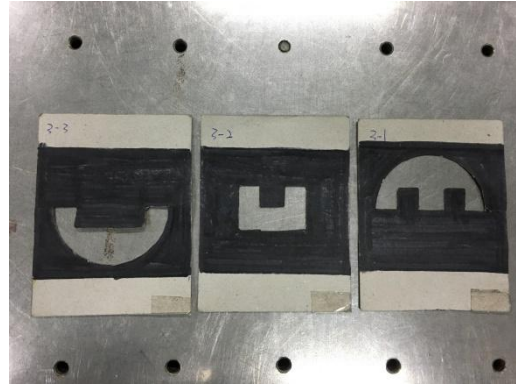


图8 拼接为圆的纸片

(3) 三次曝光后，进行暗室操作，主要包括显影（20 秒），定影（1 分钟）和漂白（约 15 分钟）。漂白以后进行水洗并用电风吹干。

2. θ 调制法假彩色编码

(1) 按图 5 调节光路，使得各元件共轴，从卤钨灯发出的光经过 L_1 后形成平行光，实例如图 9 所示。



图 9 阿贝成像仪实例图

(2) 将 θ 调制片（全息光栅）放置在光路的物面上，在频谱面上观察到一系列彩色谱斑。这几行不同取向的彩色谱斑即为衍射极大值，是相对于不同取向的光栅，也就是分别对应于图像的不同部位。这些极大值除了零级没有色散之外，其它级都有色散。

(3) 对 θ 调制片的频谱进行滤波处理，在像面上得到具有红黄绿（或其它颜色）三种颜色的像。根据各部分图像所需要的颜色，用针扎小孔让各谱斑中相应的颜色通过，并在像面上观察假彩色像，记录滤波过程及现象。

五、实验注意事项

1. 请勿用手触摸光学镜面。
2. 放在光具座上的透镜、物面、频谱面、像面、光源需要同轴等高，激光器发出的光线要与导轨水平。

六、思考题

1. 阿贝成像原理与光学空间滤波有什么关系？
2. 如果本实验所用光源为单色光源（例如激光），将产生什么现象？
3. 阿贝关于“二次衍射成像”的物理思想是什么？