

实验一 光栅参数特性研究

1. 引言

光栅是一种常用的光学色散元件，它是指在一定的空间范围内具有空间周期性分布，并能够按照一定的规律对电磁波进行振幅调制或/和相位调制的物体或装置。光栅在光学信息处理中有重要的作用，例如图像相减、光学微分等，了解其特性并确定其参数对光学信息处理系统的设计具有重要意义。同时，光栅作为周期结构，其频谱为离散谱，因此利用光栅进行实验有助于光学信息处理中频谱概念的感性认识和理解。

2. 实验目的

- 1) 了解光栅的主要特性和频谱特征；
- 2) 学习光栅常数的测量方法；
- 3) 学习用光栅测光波波长的方法。

3. 基本原理

- 1) 光栅的基本特性及光栅常数：

由于光栅在结构上具有空间周期性，好似一块由大量等宽、等间距并相互平行的细狭缝（或刻痕）组成的衍射屏，因此，光栅的基本原理和多缝衍射原理相似。

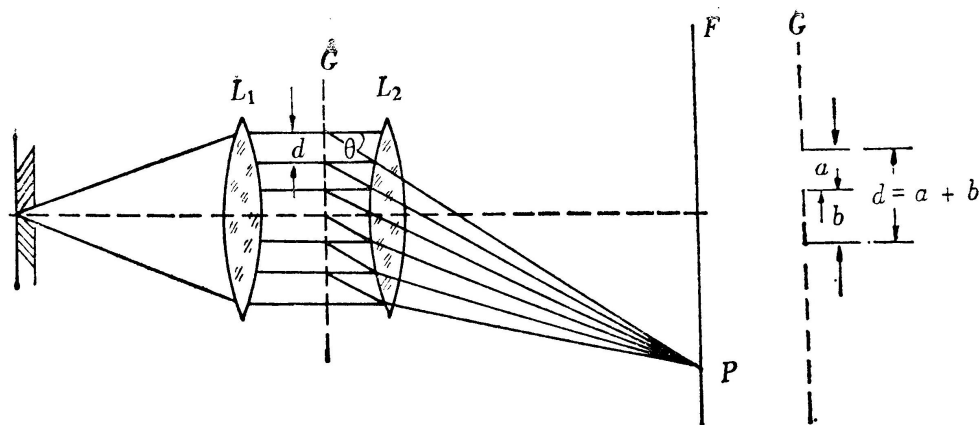


图1 光栅基本原理示意图

如图1所示，一缝光源处于透镜 L_1 的焦平面上，如果 L_1 的主轴正好通过狭缝的中心线并相互平行，则缝光源通过 L_1 后输出平行光（光斑宽度沿缝光源方向扩展）。 G 为光栅，它具有 N 条宽度为 a 的透射缝，相邻狭缝间的不透光部分的宽度为 b 。自 L_1 出射的平行光垂直地照射到光栅 G （光栅的刻线要与缝光源平行）上，透镜 L_2 将与光栅法线方向成 θ 角的衍射光会聚于 L_2 焦平面 F 的 P 点处。在 P 点处产生亮条纹的条件是：

$$d \sin \theta = k \lambda \quad (1)$$

这就是我们通常所说的光栅方程。式中 θ 为衍射角， λ 是所用光波长， k 是光谱的级次（ $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ）， $d=a+b$ ，为光栅常数。当衍射角 $\theta=0$ 时，级次 k

$=0$ ，任何波长都满足在该处为极大的条件，所以 $\vartheta=0$ 处出现中央亮条纹。对于 k 的其它数值，符号“ \pm ”表示两组光谱由中央亮条纹向左右对称分布。当已知所用光源的波长 λ 时，测出与某一级次 k 对应的 ϑ 角后，就可由(1)式求出光栅常数 d 。反过来，若已知 d ，测出 k 级的衍射角 ϑ 后，则可求得相应的波长：

$$\lambda = d \sin \vartheta / k$$

若自 L_1 出射的平行光不与光栅表面垂直时，光栅方程应写成：

$$d(\sin \vartheta - \sin i) = k\lambda \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

式中 i 为入射光与光栅法线的夹角。所以在利用(1)式时，一定要保证平行光垂直入射，否则必须利用(2)式。

2) 光栅的其它参数：

除了光栅常数外，分辨本领、角色散率和衍射效率也是描述光栅特性的三个重要参数。

分辨本领 R 定义为：

$$R = \lambda / \Delta \lambda \quad (3)$$

其中， λ 为谱线的平均波长， $\Delta \lambda$ 为刚好可分辨的两条谱线的波长差。由瑞利判据可以证明：

$$R = kN = kl/d \quad (4)$$

式中， k 为级次， N 为光栅上受到光波照明的透缝总数， l 为受光面的宽度， d 为光栅常数。

由(4)式可知：光栅在使用面积（宽度）一定的情况下，使用面积内的刻线数目越多，分辨率越高；对光栅常数一定的光栅，有效的使用面积越大，刻线数目越多，谱线越细锐，分辨率越高；高级数比低级数的光谱有较高的分辨本领。由于通常所用光栅的光谱级数不高，所以光栅的分辨本领主要取决于有效的使用面积内的刻线数目 N 。

角色散率 D 定义为：

$$D = \Delta \vartheta / \Delta \lambda \quad (5)$$

$\Delta \vartheta$ 为刚好能分辨的两条谱线的衍射角之差，也就是说，角色散率等于单位波长间隔内两个刚好可分辨的单色谱线间的角间距。对(1)式两边取微分，便可得到：

$$D = k / d \cos \vartheta \quad (6)$$

此式表明，除了波长（表现在衍射角 ϑ 的大小上）的影响外，级次越高， d 越小（即单位宽度的光栅上透光缝的条数越多），角色散率 D 越大。

3) 光栅的频谱分布：

图1中 L_2 的作用实际上是将光栅的夫琅禾费衍射图样（本来应在无穷远处观察）在近处呈现。从傅里叶光学的角度来讲，夫琅禾费衍射实际上就是对衍射屏函数进行傅里叶变换，因此在 L_2 的后焦面上，光场沿垂直光栅刻线方向的复振幅分布即为一维光栅透过率函数 $t(x)$ 的傅里叶变换 $T(\xi)$ ，即光栅的频谱（眼睛观察到的应为其光强分布，即能谱密度 $|T(\xi)|^2$ ）。

由于光栅为周期性结构，因此若其有限尺寸可忽略，其频谱应为离散谱，各频谱点的位置对应于衍射图样中亮条纹的位置。由于图1采用的是缝光源，在观察面上看到的是分立的条纹，而不是分立的点；若将缝光源改为点光源，可直接将观察到光栅的频谱点，还可以观察到这些频谱点的分布方向与其刻线方向是互相垂直的。

进一步地，若采用激光照明，由于其可近似为平行光（此时 L_1 可省略），且光照面积较小，因此在有限距离内便可观察到光栅的夫琅禾费衍射图样（此时 L_2 可省略）。如此一来，在保持上述基本原理和公式仍然适用的前提下，可简化实验设计，避免复杂的调试。本实验将采用该简化实验设计进行实验。

4. 实验仪器及用具

组件名称	包含器件
激光器组件	He-Ne 激光管、二维调节架、支杆、套筒、滑块
光栅组件	一维光栅（100 线/mm）、支杆、套筒、滑块
观察屏组件	观察屏、干板夹、支杆、套筒、滑块
其他	导轨、钢尺或卷尺、彩色 CCD 组件、电脑（含软件）等

5. 实验内容及步骤（整体光路参见图 2）

1) 调节 He-Ne 激光管的二维调节架，令激光束的高度适中，并调节水平（与台面平行），作为主光轴（中心高）。

2) 令水平激光束直接照射在光栅上，用钢尺或卷尺量出相关距离，计算出 $k=+1$ 和 -1 级时光栅对光束的衍射角；至少各测量 5 组数据。

注 1：如激光垂直照射在光栅上，且光栅和观察屏平行，则各级频谱点应对称分布于 0 级频谱点两侧。

注 2：实验中频谱点位置的测量可使用带刻度的白屏和彩色 CCD 组件，利用软件在电脑上保存图片并从图上直接读数，注意调节 CCD 的位置、角度、聚焦、光圈、曝光时间等，以使白屏刻度清晰、激光衍射斑（光栅频谱点）细锐，便于准确读数；读数时注意单位和有效数位。

3) 根据记录的数据计算衍射角，并假定激光波长已知（632.8 nm），计算光栅常数（表示为“平均值±标准偏差”）。

4) 假定光栅常数已知（根据“实验仪器及器具”表中提供的光栅标称空间频率计算），计算激光的波长 λ （表示为“平均值±标准偏差”）。

注：以上计算应根据激光束是否垂直照射在光栅的判断结果选择相应公式。

5) 测量光栅的受光面宽度，根据相关公式计算光栅 $k=\pm 1$ 级时的分辨本领。



图 2 系统实物图（仅供参考）

实验二 透镜的傅里叶变换性质

1. 引言

在单色平面波垂直照射衍射屏的情况下，夫琅禾费衍射就是屏函数的傅里叶变换，因此对透射物体进行傅里叶变换运算的物理手段就是实现它的夫琅禾费衍射。然而由于夫琅禾费衍射的远场近似条件，要想在衍射屏后面的自由空间观察到夫琅禾费衍射，条件是相当苛刻的，因此近距离观察夫琅禾费衍射时通常要借助会聚透镜来实现。也就是说，透镜可以用来实现物体的傅里叶变换。透镜是光学系统最基本的元件，正是由于透镜在一定条件下能实现傅变，才使得傅里叶分析方法在光学中得到广泛的应用。本实验通过简单的光路验证透镜的傅里叶变换性质，并通过观察常见形状的傅里叶频谱加深对傅变概念的理解。

2. 实验目的

- 1) 掌握透镜对入射波前的相位调制原理；
- 2) 体会透镜实现傅里叶变换的条件；
- 3) 观察常见图形的傅里叶频谱。

3. 基本原理

- 1) 透镜的相位调制原理：

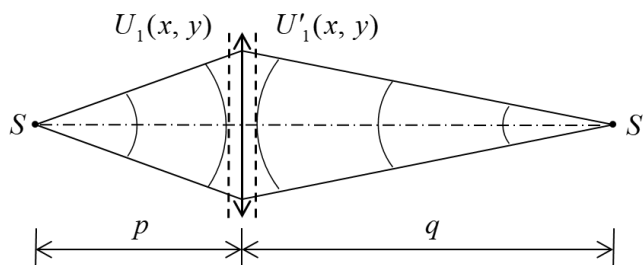


图 1 透镜的相位调制原理示意图

如图 1 所示，光轴上一点 S （距离 $p >$ 焦距 f ）发出的光经薄透镜后将汇聚于光轴上另一点 S' ，从几何光学的观点看，该过程即为点物成点像的过程，而从波动光学的观点看，则可以理解为透镜将一个发散球面波变换成一个汇聚球面波的过程。设透镜前的入射波面为 $U_1(x, y)$ ，经透镜变换后的波面为 $U'_1(x, y)$ ，则透镜的变换作用可用其复振幅透过率 $t_L(x, y)$ 来描述，即：

$$t_L(x, y) = U'_1(x, y) / U_1(x, y) \quad (1)$$

傍轴近似下，位于 S 点的单色点光源发出的发散球面波在透镜前平面上的场分布可表示为：

$$U_1(x, y) = A \exp(ikp) \exp[ik(x^2 + y^2)/2p] \quad (2)$$

式中 A 为常数，表明此时该场分布的振幅是均匀的，发生变化的只是相位。忽略透镜对光的吸收，则会聚于 S' 点的会聚球面波在透镜后平面上的场分布可近似表示为：

$$U'_1(x, y) = A \exp(-ikq) \exp[-ik(x^2 + y^2)/2q] \quad (3)$$

忽略常相位因子，可得到透镜的复振幅透过率为：

$$\begin{aligned} t_L(x, y) &= U'_1(x, y) / U_1(x, y) = \exp[-ik(x^2 + y^2)(1/p + 1/q)/2] \\ &= \exp[-ik(x^2 + y^2)/2f] \end{aligned} \quad (4)$$

其中应用到了物像共轭的高斯公式， f 为透镜的像方焦距，正透镜 $f>0$ ，负透镜 $f<0$ 。

该结果表明，透镜的作用在于对入射波面的相位进行调制（或变换），从而使一个发散球面波变换成一个会聚球面波。而当一个单位振幅的平面波平行光轴入射时，入射波面为 $U_1(x, y)=1$ ，经透镜相位变换后的出射波面即为 $U_1'(x, y)=t_L(x, y)=\exp[-ik(x^2+y^2)/2f]$ 。若考虑透镜孔径的有限大小，则透镜的相位变换因子可表示为：

$$t_L(x, y)=P(x, y) \exp[-ik(x^2+y^2)/2f] \quad (5)$$

其中 $P(x, y)$ 为光瞳函数，在透镜孔径内其值为1，其它为0。

2) 透镜的傅里叶变换作用：

正透镜除了具有成像性质外，还能做傅里叶变换，正因如此，傅里叶分析方法在光学中得到了广泛而成功的应用。

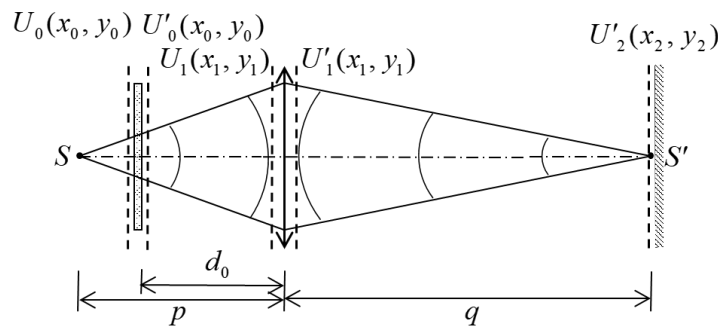


图2 透镜的傅里叶变换性质示意图

如图2所示，假设衍射屏置于透镜前距离为 d_0 处，屏函数（即衍射屏的复振幅透过率）为 $t_0(x_0, y_0)$ ，在薄物体和傍轴近似下可得到：

$$U_0(x_0, y_0)=A_0 \exp[ik(p-d_0)] \exp[ik(x_0^2+y_0^2)/2(p-d_0)] \quad (6)$$

$$U'_0(x_0, y_0)=U_0(x_0, y_0) t_0(x_0, y_0) \quad (7)$$

$$U_1(x_1, y_1)=[\exp(ikd_0)/i\lambda d_0] \iint U'_0(x_0, y_0) \exp\{ik[(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2]/2d_0\} dx_0 dy_0 \quad (8)$$

$$U'_1(x_1, y_1)=U_1(x_1, y_1) t_L(x_1, y_1) \quad (9)$$

$$U_2(x_2, y_2)=[\exp(ikq)/i\lambda q] \iint U'_1(x_1, y_1) \exp\{ik[(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2]/2q\} dx_1 dy_1 \quad (10)$$

其中(8)式和(10)式为菲涅尔衍射公式，分别代表从衍射屏后到透镜前以及从透镜后到观察屏的两个菲涅尔衍射过程。忽略透镜的有限孔径限制，将(6)至(9)式逐步代入(10)式并利用透镜相位变换因子 t_L 的(4)式，可得到简化计算结果为：

$$U_2(x_2, y_2)=C \exp[ik(x_2^2+y_2^2)/2b] \text{FT}\{t_0(x_1, y_1)\} \quad (11)$$

其中 C 为复常数，不影响光场的相对分布；而 $b=fd_0/(f-d_0)+q$ ，其大小与衍射屏与透镜之间的距离 d_0 有关； $\text{FT}\{\}$ 表示对函数进行傅里叶变换，变换后观察面上空间频率与位置坐标的关系为 $\xi=(x_2/\lambda b)\times f/(f-b_0)$ 、 $\eta=(y_2/\lambda b)\times f/(f-b_0)$ 。该结果表明在照明点光源 S 的共轭面上接收到的光场分布，除了一个二次相位因子之外，就是衍射屏的傅里叶变换，或者说观察面上的衍射场是夫琅禾费型的。这就是透镜的傅里叶变换作用。

特别地，当衍射屏刚好位于透镜前焦面，即 $d_0=f$ 时，有 $1/b=0$ ，此时二次相位因子消失， $U_2'(x_2, y_2)=C \text{FT}\{t_0(x_1, y_1)\}$ ，称为准确傅里叶变换，此时观察面上空间频率与位置坐标的关系恒为 $\xi=x_2/\lambda f$ 、 $\eta=y_2/\lambda f$ ，与光源和观察屏位置无关，通常可使问题简化，因此是较为常见的情形；若将点光源 S 平移到无限远，则照明光波变成垂直照射衍射屏的平面波，此时 $p=\infty$ ， $q=f$ ，即能观察到衍射屏傅里叶变换

的平面（称为频谱面）将相应地平移到透镜后焦面。相比点光源（球面波）照明情形，采用平面波照明，同时将衍射屏置于透镜前焦面、观察屏置于透镜后焦面，是利用透镜实现准确傅里叶变换的最简单情形，应用非常广泛，如典型的 3 镜 4F 空间滤波系统中采用的就是该情形。

4. 实验仪器及用具

组件名称	包含器件
激光器组件	He-Ne 激光管、二维调节架、支杆、套筒、滑块
针孔滤波组件	显微物镜（40×）、三维调节架、针孔（25 μ m）、支杆、套筒、滑块
准直透镜组件	凸透镜（ ϕ 40mm、 $f=200$ mm）、透镜支架、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
衍射屏组件（2 套）	小孔/可调狭缝、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
光栅组件	一维光栅（100 线/mm）、干板夹、一维燕尾平移台、支杆、套筒、滑块
傅变透镜组件	凸透镜（ ϕ 50mm、 $f=150$ mm）、透镜支架、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
观察屏组件	观察屏、干板夹、支杆、套筒、滑块
其他	导轨、钢尺或卷尺、彩色 CCD 组件、电脑（含软件）

5. 实验内容及步骤（整体光路参见图 2）

1) 调节 He-Ne 激光管的二维调节架，令激光束的高度适中，并调节水平（与导轨平行），作为主光轴（中心高）。

2) 逐个调整光学元件（透镜、衍射屏、光栅、观察屏、针孔滤波器等），使它们均与主光轴等高共轴。

注意：观察屏上记录的激光束位置和小孔衍射屏（带小孔的分划板）在等高共轴调节时可作为确定主光轴的两个基准点，应使激光束透过每个器件后其中心仍然能通过该两个基准点；对于透镜，可分别观察两表面反射的系列光点是否位于同一直线上来辅助判断；针孔滤波器可作为最后一个调节等高共轴的器件。

3) 利用针孔滤波组件中的显微物镜进行扩束，并调节针孔进行滤波，使扩束形成亮度均匀柔和的圆形光斑。

4) 利用准直透镜进行光束准直。由于准直透镜的焦距为 200 mm，该透镜应放在针孔后 200 mm 左右的位置，用白纸在准直透镜后记录下光斑的大小，然后在较远的位置再次记录光斑的大小，如不一致时需前后调整准直透镜的位置，直到远近光斑大小基本一致。

5) 布置傅里叶变换光路，即将用于傅里叶变换的透镜置于准直照明光路中，并使其与准直透镜的距离大于一倍焦距，找到傅里叶变换透镜的后焦面并将观察屏置于该位置，最后以可调狭缝作为衍射屏置于傅里叶变换透镜前焦面附近，调节合适的狭缝宽度，在观察屏上观察并记录其傅里叶频谱。

6) 稍微改变狭缝宽度，观察并记录其傅里叶频谱的变化情况，根据其变化规律验证观察屏上的衍射场为夫琅禾费型。

7) 将狭缝分别换成光栅和小孔（选做），观察并记录其傅里叶频谱，分析其特点。

8) 稍微前后移动衍射屏(狭缝、小孔、光栅任选其一)的位置,观察并记录观察屏上图样是否有变化,分析原因。

9) 将准直透镜稍微移开原来的位置,观察并记录观察屏上图样是否有变化,并稍微前后移动观察屏看是否还有可能观察到清晰的频谱图像;如可以,观察频谱图像与之前是否有区别,分析原因。



图2 系统实物图(仅供参考)

实验三 3镜4f系统搭建实验

1. 引言

最典型的相干滤波系统采用单色平面波垂直照明,同时采用两个焦距相同的傅里叶变换透镜,将衍射屏置于第一个傅变透镜的前焦面(P_1 ,输入面),观察屏置于第二个傅变透镜的后焦面(P_3 ,输出面),并令第一个傅变透镜的后焦面与第二个傅变透镜的前焦面重合(P_2 ,频谱面)。该系统称为3镜4f系统,简称4F系统,如图1所示。根据透镜的傅里叶变换性质可知,这种情况下频谱面上得到的光场为衍射屏的准确傅里叶变换,而观察屏上得到的光场则为频谱面光场的傅里叶变换,因此根据迭次傅里叶变换性质,观察屏上将得到衍射屏的等大倒立像;若采用空间滤波器对频谱面上的频谱分布进行调制,则可方便地实现空间滤波的作用。本实验主要学习搭建该4F系统。

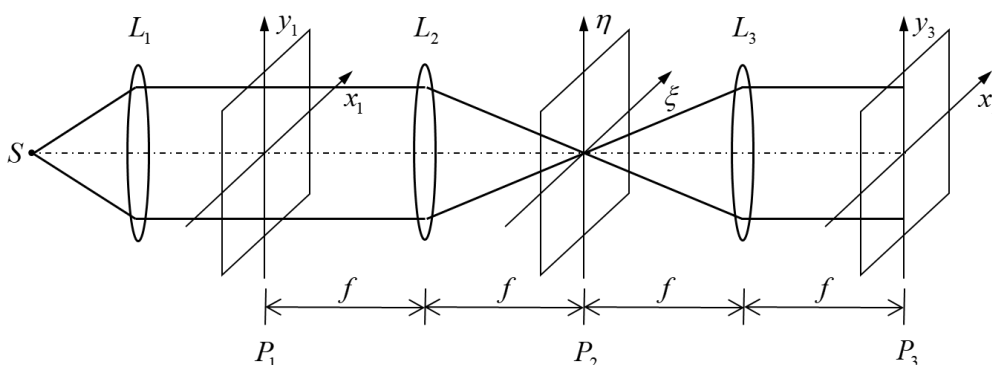


图13 3镜4f系统示意图

2. 实验目的

- 1) 掌握典型3镜4f空间滤波系统的搭建。
- 2) 通过实验,加深对空间频率、空间频谱概念和空间滤波原理的理解。
- 3) 通过实验,加深对傅里叶变换的相移定理和卷积定理的理解。

3. 基本原理

1) 3 镜 4f 系统空间滤波的基本原理:

根据透镜的傅里叶变换性质, 当采用单色平面波垂直照明、衍射屏位于透镜前焦面、观察屏位于透镜后焦面时, 观察屏上得到的光场分布除了一个不影响光场分布的复常数外, 就是屏函数的傅里叶变换, 因此若记 P_1 平面上的屏函数为 $t_0(x_1, y_1)$, 则 P_2 平面上的光场分布 (复振幅) 为:

$$U_2(x_2, y_2) = C \text{FT} \{t_0(x_1, y_1)\} \quad (1)$$

且空间频率与该平面上位置坐标的关系为 $\xi = x_2/\lambda f$ 、 $\eta = y_2/\lambda f$, 其中 f 为傅里叶变换透镜的焦距, λ 为照明光波波长。

同理, P_3 平面上的光场分布为:

$$\begin{aligned} U_3(x_3, y_3) &= C' \text{FT} \{U_2(x_2, y_2)\} \\ &= CC' \text{FT} \{ \text{FT} \{t_0(x_1, y_1)\} \} = CC' t_0(-x_3, -y_3) \end{aligned} \quad (2)$$

其中应用到了傅里叶变换的基本性质, 即迭次傅里叶变换性质。该结果说明 P_3 平面上得到的是衍射屏的倒立像。若忽略复常数, 且 P_3 面采用反演坐标系, 则有:

$$U_2(x_2, y_2) = \text{FT} \{t_0(x_1, y_1)\} \quad (3)$$

$$U_3(x_3, y_3) = t_0(x_3, y_3) = \text{FT}^{-1} \{U_2(x_2, y_2)\} \quad (4)$$

即此时三个平面光场之间的关系可以看成一次傅里叶变换与一次逆傅里叶变换。

当频谱面上采用空间滤波器对空间频谱进行调制时, 设空间滤波器的复振幅透过率为 $H(x_2, y_2)$, P_3 面上将得到滤波后的输出, 即:

$$U_3(x_3, y_3) = \text{FT}^{-1} \{H(x_2, y_2) \text{FT} \{t_0(x_1, y_1)\} \} \quad (5)$$

通常当 P_3 平面采用反演坐标系后, 上式中 (x_1, y_1) 和 (x_3, y_3) 的下角标可以省略; 而由于 P_2 平面上的坐标与空间频率之间为一一对应关系, (x_2, y_2) 也常用 (ξ, η) 代替。

2) 光栅的空间滤波分析:

设有一个光栅常数为 d 、缝宽为 a 、宽度为 L 的一维光栅, 其复振幅透过率可表示为:

$$t(x_1) = \left[\frac{1}{d} \text{comb} \left(\frac{x_1}{d} \right) * \text{rect} \left(\frac{x_1}{a} \right) \right] \text{rect} \left(\frac{x_1}{L} \right) \quad (6)$$

因此频谱面上的光场分布应正比于:

$$\begin{aligned} T(\xi) &= \left[\frac{1}{d} \text{FT} \left\{ \text{comb} \left(\frac{x_1}{d} \right) \right\} \text{FT} \left\{ \text{rect} \left(\frac{x_1}{a} \right) \right\} \right] * \text{FT} \left\{ \text{rect} \left(\frac{x_1}{L} \right) \right\} \\ &= \frac{aL}{d} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{am}{d} \right) \cdot \text{sinc} \left[L \left(\xi - \frac{m}{d} \right) \right] \\ &= \frac{aL}{d} \left\{ \text{sinc} (L\xi) + \text{sinc} \left(\frac{a}{d} \right) \cdot \text{sinc} \left[L \left(\xi - \frac{1}{d} \right) \right] + \text{sinc} \left(\frac{a}{d} \right) \cdot \text{sinc} \left[L \left(\xi + \frac{1}{d} \right) \right] + \dots \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

即频谱面上将得到一系列具有一定宽度 (半径约为 $\lambda f/L$) 的频谱点, 相邻频谱点距离 $\lambda f/d$, 且各频谱点的振幅受到 $\text{sinc}(am/d)$ 函数的调制, 与光栅的占空比 a/d 有关; 当某一频谱点刚好处于该 sinc 函数的零点时 (即 $am/d = \pm n$, $n \neq 0$), 该级频谱将出现“缺级”现象。这就是我们熟悉的一维光栅的频谱 (或夫琅禾费衍射图样)。

当频谱面上采用不同的滤波器时，观察屏上将得到不同的滤波结果。例如当采用可调狭缝仅让零级频谱通过时，观察屏上将得到：

$$U_3 \propto FT^{-1} \left\{ \frac{aL}{d} \text{sinc}(L\xi) \right\} = \frac{a}{d} \text{rect} \left(\frac{x'_3}{L} \right) \quad (8)$$

即仅能得到一个和光栅一样大小的均匀光波场，也就是说零级频谱对应的仅为均匀背景部分，光栅的结构信息被完全滤除了。

而当增大狭缝宽度使零级和 ± 1 级频谱均能通过时，观察屏上将得到：

$$U_3 \propto FT^{-1} \{ T(\xi) H(\xi) \} = \Lambda = \frac{a}{d} \text{rect} \left(\frac{x'_3}{L} \right) \cdot \left[1 + 2 \text{sinc} \left(\frac{a}{d} \right) \cos \left(2\pi \frac{x'_3}{d} \right) \right] \quad (9)$$

即得到的将是除了均匀背景外还有一个周期为 d 的余弦分布。显然， ± 1 级频谱包含了光栅的初级结构信息，因此滤波后结构的基本性质被保留了（周期不变），但高频分量对应的细节信息（矩形的棱角）则完全被滤除了。

相反的，若采用一个足够小的圆屏仅挡住零级频谱，则观察屏上将得到：

$$U_3 \propto t(x'_3) - \frac{a}{d} \text{rect} \left(\frac{x'_3}{L} \right) \quad (10)$$

此时根据光栅的占空比情况，有可能出现对比度反转的情形。

4. 实验仪器及用具

组件名称	包含器件
激光器组件	He-Ne 激光管、二维调节架、支杆、套筒、滑块
针孔滤波组件	显微物镜（40×）、三维调节架、针孔（25μm）、支杆、套筒、滑块
准直透镜组件	凸透镜（φ40mm、f=200mm）、透镜支架、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
衍射屏组件	一维光栅（100线/mm）、干板夹、一维燕尾平移台、支杆、套筒、滑块
傅变透镜组件（2套）	凸透镜（φ50mm、f=150mm）、透镜支架、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
滤波器组件	可调狭缝、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
观察屏组件	观察屏、干板夹、支杆、套筒、滑块
其他	导轨、钢尺或卷尺、彩色 CCD 组件、电脑（含软件）

5. 实验内容及步骤（整体光路参见图2）

1) 调节 He-Ne 激光管的二维调节架，令激光束的高度适中，并调节水平（与导轨平行），作为主光轴（中心高）；逐个调整光学元件，使它们均与主光轴等高共轴；利用针孔滤波组件中的显微物镜进行扩束，并调节针孔进行滤波，使扩束形成亮度均匀柔和的圆形光斑；利用准直透镜 L_1 进行光束准直

注意：具体调节方法同实验二；应尽量使激光器靠边放置，并在保证滤波器可调节的前提下尽量使滤波器靠近激光器，为后面的4F系统预留足够的空间。

2) 按图1的示意图布置4F系统光路：衍射屏置于第一个傅变透镜 L_2 的前焦面 P_1 ，空间滤波器置于 L_2 的后焦面 P_2 ，同时 P_2 也是第二个傅变透镜 L_3 的前焦面，观察屏则置于 L_3 的后焦面。实验所用傅变透镜的焦距为150mm，故4F

系统从输入面（衍射屏）到输出面（观察屏）共需 600 mm 的距离，可用卷尺先大致量出每两面的距离，再按照以下步骤对 4F 系统进行调整：

a. 在准直透镜 L_1 后面（预留略大于 150 mm 的距离，以便摆放衍射屏及其滑块）放上透镜 L_2 并固定，将观察屏置于 L_2 之后大约 150 mm 处，移动其位置使从 L_1 出来的平行光束经过 L_2 聚焦在观察屏上，此时观察屏处即为 P_2 面，即 L_2 的后焦面，也就是 4F 系统的频谱面；测量 L_2 和 P_2 的距离即为 L_2 的实际焦距 f_2 ；固定 P_2 处的滑块，取下观察屏（可连同干板夹； P_2 处的滑块应装有垂直于导轨方向的一维燕尾平移台）。

b. 在 L_2 后面大约 300 mm 处放上透镜 L_3 ，并将观察屏（装上新的滑块）置于 L_3 之后用于观察从 L_3 出来的光束是否为平行光束，否则移动 L_3 的位置，直至光束平行，固定 L_3 ；测量 L_3 和 P_2 的距离即为 L_3 的实际焦距 f_3 。

c. 在 L_2 前面距离为 f_2 处（即 P_1 面）放上衍射屏（一维光栅，令其周期沿水平方向）；将观察屏固定于 L_3 后面距离为 f_3 处（即 P_3 面）。

3) 将一维光栅按其栅线竖向置于输入面（即 P_1 面）上，并使其沿垂直光轴方向可水平横向微动（用一维燕尾平移台来实现），在频谱面（即 P_2 面）位置观察并记录其傅里叶频谱；然后左右移动一维光栅，观察并记录频谱是否有变化并分析原因。

4) 将一维光栅从输入面取下并按其栅线竖向置于频谱面（即 P_2 面）上，并使其沿水平横向可微动（用一维燕尾平移台来实现），在输出面（即 P_3 面）位置观察并就其逆傅里叶变换，分析其特征；然后左右移动一维光栅，观察并记录频谱是否有变化，分析原因。

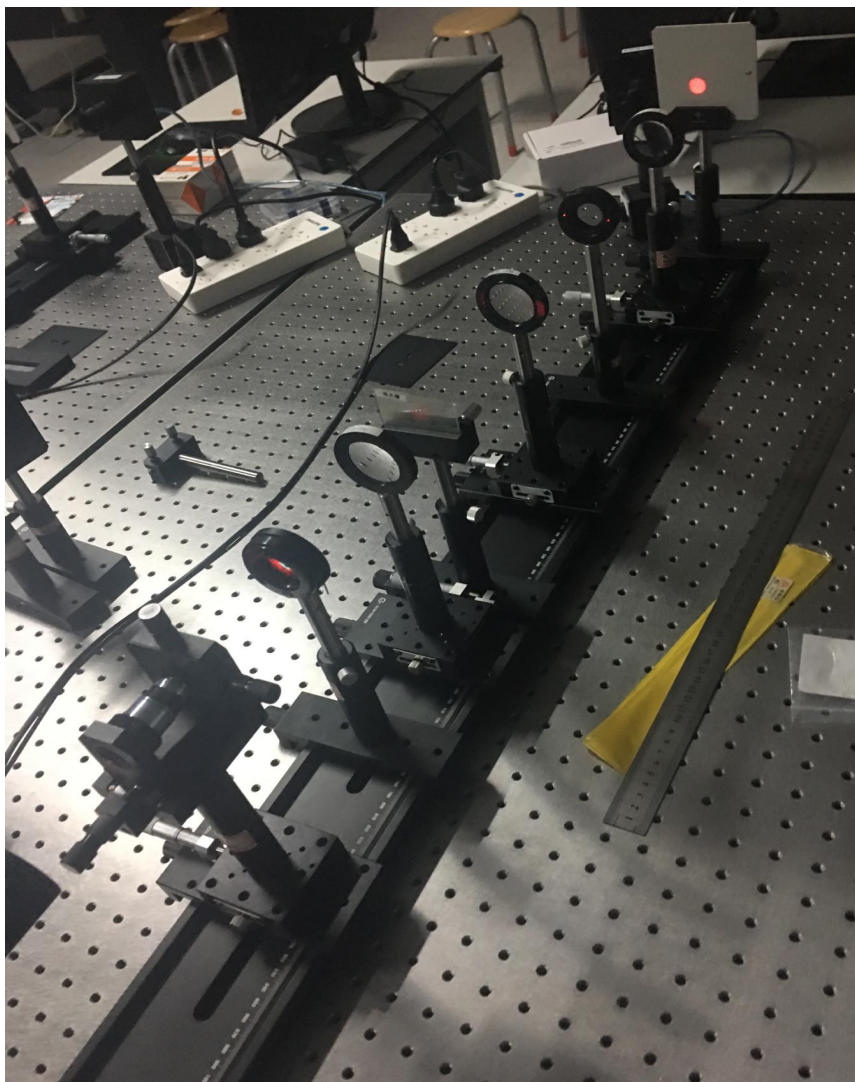


图 2 系统实物图（仅供参考）

实验四 光学图像相减和微分实验

1. 引言

图像相减和微分是相干光信息处理中的两种典型运算。图像相减获取两张相近照片的差异，从而反映事物的变化或区别，例如对不同时期拍摄的两张照片进行相减，在医学上可发现病灶的变化，在军事上可发现地面军事设施的增减，在农业上可预测农作物的长势，在工业上可检查集成电路掩膜的疵病，等等。此外图像相减还可用于地球资源探测、气象变化以及城市发展研究等各个领域。光学微分则是突出图像边缘的一种重要方法。人的视觉对于边缘比较敏感，因此对于一张比较模糊的图像，若能突出其边缘轮廓则会变得更加容易识别。本实验介绍基于典型 3 镜 4f 空间滤波系统的图像相减和微分处理方法，利用正弦光栅作为空间滤波器实现图像相减，利用复合光栅作为滤波器实现光学微分处理。

2. 实验目的

- 1) 掌握利用正弦光栅作为滤波器对图像进行相减处理的原理和方法。
- 2) 掌握利用复合光栅对光学图像进行微分处理的原理和方法，体会光学微

分处理的作用。

3. 基本原理

1) 利用一维光栅实现光学图像相减的原理:

设正弦光栅的空间频率为 ξ_0 , 将其置于 3 镜 4f 系统的滤波平面 (频谱面 P_2) 上作为滤波器, 如图 1 所示, 滤波器的复振幅透过率为:

$$\begin{aligned} H(\xi, \eta) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi\xi_0 x_2 + \phi_0) \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \exp[i(2\pi\xi_0 x_2 + \phi_0)] + \frac{1}{4} \exp[-i(2\pi\xi_0 x_2 + \phi_0)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\xi = x_2 / \lambda f$, $\eta = y_2 / \lambda f$; f 为傅变透镜焦距; ξ_0 为光栅的空间频率; ϕ_0 表示光栅的初位相, 它取决于光栅相对于坐标原点的位置 (垂直光栅刻线方向)。

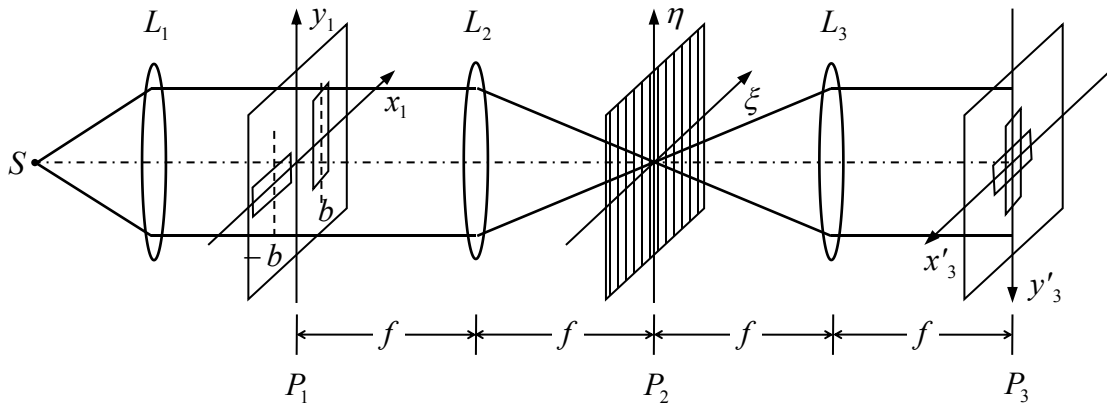


图 1 利用正弦光栅实现图像相减的原理示意图

将图像 A 和图像 B 置于输入面 P_1 上, 且沿 x_1 方向相对于坐标原点对称放置, 图像中心与光轴的距离均为 b 。选择光栅的频率使得 $b = \lambda f \xi_0$, 以保证滤波后两图像中 A 的+1 级像和 B 的-1 级像能恰好在光轴处重合。于是, 输入复振幅分布可写成:

$$U_1(x_1, y_1) = t_A(x_1 - b, y_1) + t_B(x_1 + b, y_1) \quad (2)$$

其在频谱面 P_2 上的频谱为:

$$\begin{aligned} U_2(\xi, \eta) &= T_A(\xi, \eta) \exp(-i 2\pi b \xi) + T_B(\xi, \eta) \exp(i 2\pi b \xi) \\ &= T_A(\xi, \eta) \exp(-i 2\pi \xi_0 x_2) + T_B(\xi, \eta) \exp(i 2\pi \xi_0 x_2) \end{aligned} \quad (3)$$

经光栅滤波后的频谱为:

$$\begin{aligned} U_2(\xi, \eta) H(\xi, \eta) &= \frac{1}{4} [T_A(\xi, \eta) \exp(i\phi_0) + T_B(\xi, \eta) \exp(-i\phi_0)] \\ &\quad + \frac{1}{2} [T_A(\xi, \eta) \exp(-i 2\pi \xi_0 x_2) + T_B(\xi, \eta) \exp(i 2\pi \xi_0 x_2)] \\ &\quad + \frac{1}{4} \{T_A(\xi, \eta) \exp[-i(4\pi\xi_0 x_2 + \phi_0)] + T_B(\xi, \eta) \exp[i(4\pi\xi_0 x_2 + \phi_0)]\} \end{aligned} \quad (4)$$

再通过透镜 L_2 进行逆傅里叶变换 (取反演坐标系), 则在输出面 P_3 上的光场复振幅分布为:

$$\begin{aligned} U_3(x'_3, y'_3) &= FT^{-1}\{U_2(\xi, \eta) H(\xi, \eta)\} \\ &= \frac{1}{4} \exp(i\phi_0) [t_A(x'_3, y'_3) + t_B(x'_3, y'_3) \exp(-i2\phi_0)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} [t_A(x'_3 - b, y'_3) + t_B(x'_3 + b, y'_3)] \\
& + \frac{1}{4} \{t_A(x'_3 - 2b, y'_3) \exp(-i\phi_0) + t_B(x'_3 + 2b, y'_3) \exp(i\phi_0)\} \quad (5)
\end{aligned}$$

当光栅条纹的初位相取 $\phi_0 = \pi/2$ ，即光栅条纹偏离轴线 1/4 周期时，上式第一项中的因子 $\exp(-i2\phi_0) = -1$ ，于是上式变为：

$$U_3(x'_3, y'_3) = \frac{i}{4} [t_A(x'_3, y'_3) - t_B(x'_3, y'_3)] + \text{其余四项} \quad (6)$$

结果表明，在输出面 P_3 的光轴附近实现了图像相减，效果如图 2 所示。



图 2 图像相减结果示意图

而当光栅条纹的初位相取 $\phi_0 = 0$ ，即光栅条纹与轴线重合时，上式第一项中的指数因子均等于 1，结果在输出面 P_3 的光轴附近实现了图像相加。如前所述，改变光栅的初相位可通过调节光栅相对于坐标原点的位置（垂直光栅刻线方向）来实现，当光栅的位置连续变化时，输出面上将可以观察到图像相加和相减的结果交替出现的情形。但由于光栅的周期很小，实现相加和相减时光栅的位置相差仅有 1/4 个周期，因此必须很缓慢地移动光栅才可以观察到实验现象。

若采用一维矩形光栅代替正弦光栅，则图像 A 和图像 B 将分别产生若干个像，只要能使 A 的+1 级像和 B 的-1 级像能恰好在光轴处重合并且相位相反或相同，也同样可以实现图像相减或相加的效果。

2) 利用复合光栅实现光学微分处理的原理：

复合光栅是利用光学全息方法制作的，可以看成是两套空间频率相差不多的正弦光栅图案的两次曝光叠加。利用复合光栅作为滤波器实现光学微分，其基本原理是先使待处理图像生成两个相互有点错位的像，然后通过改变这两个像的相位让其重叠部分相减而只留下由于错位而形成的边缘部分，从而实现图像边缘增强的效果。从数学角度来说，可以说是用差分代替了微分。

将复合光栅置于 3 镜 4F 系统的频谱面上作为滤波器，如图 3 所示。

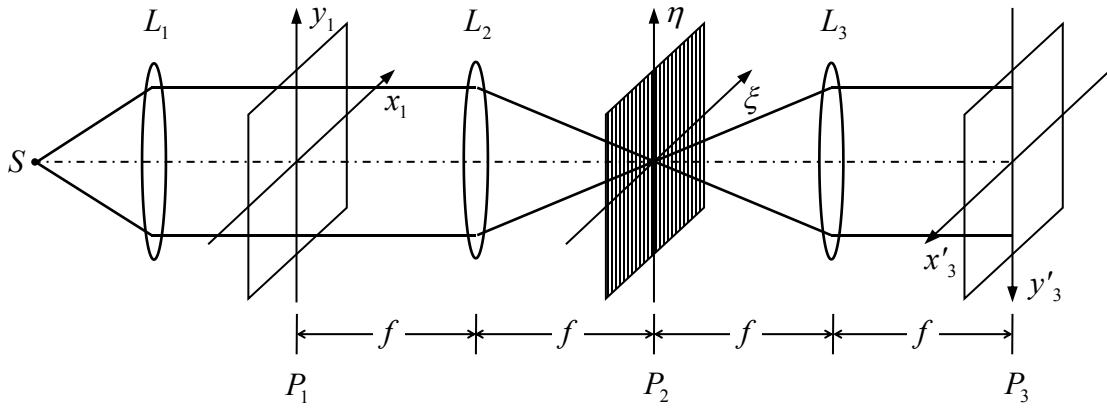


图 3 利用复合光栅实现光学微分的原理示意图

物体置于输入面，复振幅分布为 $t(x_1, y_1)$ ，则滤波前频谱面的空间频谱为

$$T(\xi, \eta) = FT\{t(x_1, y_1)\} \quad (7)$$

其中空间频率 ξ 、 η 与频谱面坐标的关系分别为： $\xi = x_2/\lambda f$ 、 $\eta = y_2/\lambda f$ ， f 为傅里叶变换透镜的焦距。

设复合光栅的两个空间频率为 ξ_1 和 ξ_2 ，则其作为滤波器的复振幅透过率为：

$$H(\xi, \eta) = \frac{1}{2} [H_1(\xi, \eta) + H_2(\xi, \eta)] \quad (8)$$

其中 H_1 、 H_2 分别是空间频率为 ξ_1 和 ξ_2 的正弦光栅透过率函数，即：

$$\begin{aligned} H_1(\xi, \eta) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi\xi_1 x_2 + \phi_1) \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \exp[i(2\pi\xi_1 x_2 + \phi_1)] + \frac{1}{4} \exp[-i(2\pi\xi_1 x_2 + \phi_1)] \end{aligned} \quad (9)$$

$$H_2(\xi, \eta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \exp[i(2\pi\xi_2 x_2 + \phi_2)] + \frac{1}{4} \exp[-i(2\pi\xi_2 x_2 + \phi_2)] \quad (10)$$

滤波后空间频谱变为 $T(\xi, \eta) H(\xi, \eta)$ ，输出面 P_3 上可得其逆傅里叶变换（反演坐标系下），即：

$$U(x'_3, y'_3) = FT^{-1}\{T(\xi, \eta)H(\xi, \eta)\} = t(x'_3, y'_3) * h(x'_3, y'_3) \quad (11)$$

其中 $h = FT^{-1}\{H\}$ 为系统的点扩散函数，即：

$$h(x'_3, y'_3) = \frac{1}{2} [h_1(x'_3, y'_3) + h_2(x'_3, y'_3)] \quad (12)$$

$$h_1(x'_3, y'_3) = \frac{1}{2} \delta(x'_3, y'_3) + \frac{1}{4} e^{i\phi_1} \delta(x'_3 + \lambda f \xi_1, y'_3) + \frac{1}{4} e^{-i\phi_1} \delta(x'_3 - \lambda f \xi_1, y'_3) \quad (13)$$

$$h_2(x'_3, y'_3) = \frac{1}{2} \delta(x'_3, y'_3) + \frac{1}{4} e^{i\phi_2} \delta(x'_3 + \lambda f \xi_2, y'_3) + \frac{1}{4} e^{-i\phi_2} \delta(x'_3 - \lambda f \xi_2, y'_3) \quad (14)$$

由此可见输出面上物频谱受到了两个正弦光栅的调制，其复振幅分布相当于由两个正弦光栅产生。而其中每一个正弦光栅将在输出面 P_3 上得到三个清晰的衍射像，其中 0 级像的中心位于输出面原点，而 ± 1 级像则沿 x'_3 轴对称分布于 y'_3 轴两侧，中心距离原点分别为 $\pm b_{1,2} = \pm \lambda f \xi_{1,2}$ 。因此，当 $\Delta\xi = \xi_1 - \xi_2$ 很小时， $\Delta b = \lambda f \Delta\xi$ 也很小，从而两个同级衍射像几乎重叠，沿 x'_3 方向只错开了很小的距离 Δb ，如图 4 所示。

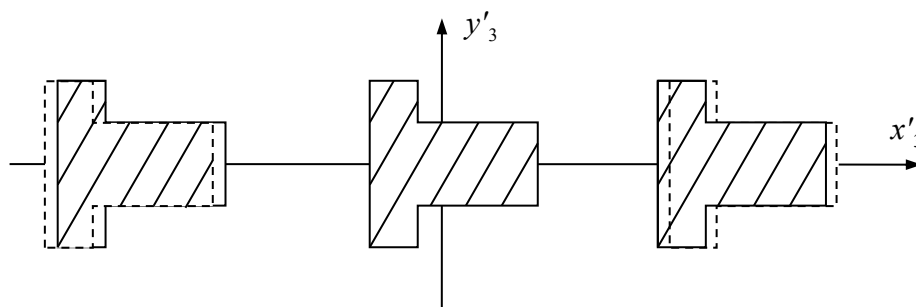


图4 在输出面上得到的图像微分结果示意图

图中实线表示由 $\xi_1=100$ 线/mm的正弦光栅产生的衍射像,虚线表示由 $\xi_2=102$ 线/mm的正弦光栅产生的衍射像,两者产生的0级衍射像在坐标原点处重合。

使复合光栅微微平移到初相位满足 $\phi_2 - \phi_1 = \pi + 2n\pi$,可使两个+1级像(或两个-1级像)的相位将正好相差 π ,因此相干叠加时两者的重叠部分(如图2中的阴影部分)相消,只剩下错开的图像边缘部分。当 Δb 比起图形本身的尺寸要小很多时(见上图),就实现了边缘增强效果,转换成强度分布时将形成亮线,构成光学微分图形,如图5所示。在数学上,则有:

$$U_{3,+1}(x'_3 - b_1, y'_3) = \frac{1}{8} e^{i\phi} [t(x'_3, y'_3) - t(x'_3 - \Delta b, y'_3)] \approx \frac{1}{8} e^{i\phi} \cdot \Delta b \cdot \frac{\partial t(x'_3, y'_3)}{\partial x'_3} \quad (15)$$

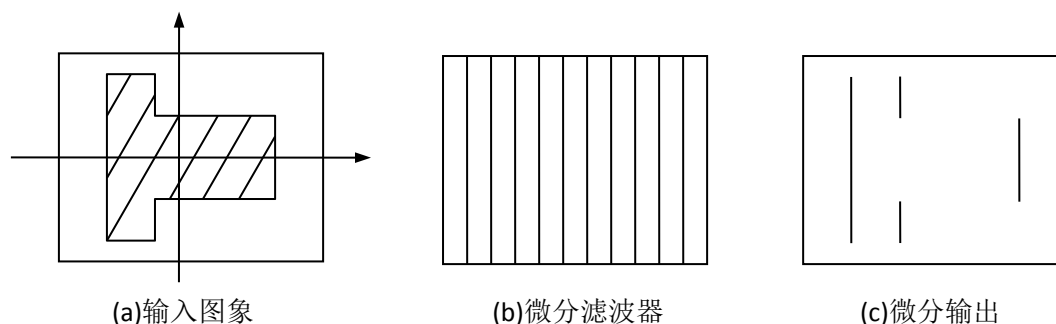


图5 沿x方向光学微分处理示意图

复合光栅的条纹方向不同,得到的微分图形也不同,若将图3中的复合光栅条纹在平面内旋转 90° ,则原本沿x方向的微分图形将变为沿y方向的微分图形,如图6所示。

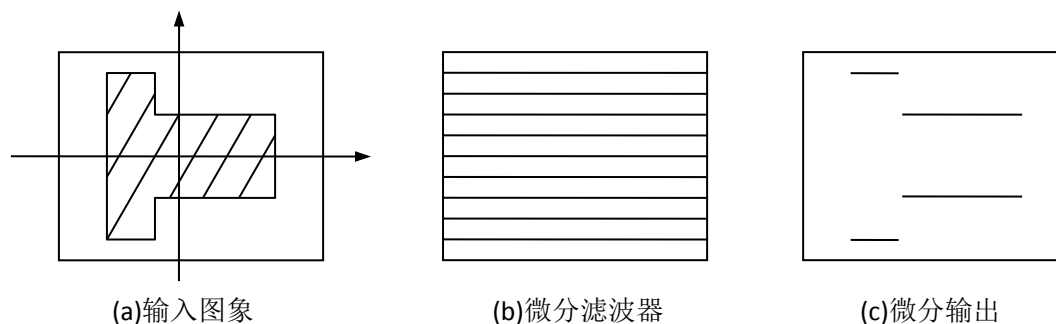


图6 沿y方向光学微分处理示意图

4. 实验仪器及用具

组件名称	包含器件
激光器组件	He-Ne 激光管、二维调节架、支杆、套筒、滑块
针孔滤波组件	显微物镜(40×)、三维调节架、针孔(25μm)、支杆、套筒、

	滑块
准直透镜组件	凸透镜 ($\phi 40\text{mm}$ 、 $f=200\text{mm}$)、透镜支架、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
目标物组件	目标物 (两个互相垂直的矩形孔、可调狭缝)、干板夹、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
傅变透镜组件 (2套)	凸透镜 ($\phi 50\text{mm}$ 、 $f=150\text{mm}$)、透镜支架、支杆、套筒、一维燕尾平移台、滑块
光栅组件	一维光栅 (100线/mm)、复合光栅 (100/102线/mm)、干板夹、一维燕尾平移台、支杆、套筒、滑块
观察屏组件	观察屏、干板夹、支杆、套筒、滑块
其他	导轨、钢尺或卷尺、彩色 CCD 组件、电脑 (含软件)

5. 实验内容及步骤 (整体光路参见图 7)

1) 实验参数验证 (需在报告中写明过程和结果):

为简洁起见, 该实验采用两个互相垂直的矩形孔 (如图 2 所示) 作为图像相减处理的图形 A 和 B。根据原理, 两者中心相距为 $2b$ (为使其 0 级像和 ± 1 级像能分开, 距离 b 必须大于图形的长边)。实验前先用卷尺仔细测量 $2b$ 的值, 并根据一维光栅、激光器、傅变透镜等的参数验证条件 $\xi_0 = b/\lambda f$ 是否满足。

光学微分时选用可调狭缝作为待处理图像, 实验前请先根据复合光栅、激光器、傅变透镜等的参数计算 Δb 值, 并据此讨论可调狭缝的宽度应如何选择。

2) 搭建 3 镜 4f 系统, 具体步骤同实验三;

3) 将一维光栅按其栅线竖向置于频谱面 (即 P_2 面) 上, 并使其沿垂直光轴方向可水平横向微动 (用一维燕尾平移台来实现), 在观察屏 P_3 上观察图形 A 的 +1 级衍射像 A_{+1} 和对图形 B 的 -1 级衍射像 B_{-1} , 使 A_{+1} 和 B_{-1} 的中心重合于光轴上。若 A_{+1} 和 B_{-1} 的中心重合不好, 可稍微调节图形 A、B 所在的目标板的位置 (同样用一维燕尾平移台来实现)。

4) 观察并记录图形的相加和相减效果: 令光栅沿水平横向微动时, 便可在输出面 P_3 观察到 A_{+1} 和 B_{-1} 的重合处周期地交替出现图形 A、B 相加和相减的效果。相加时重合处亮度增加, 相减时重合处变暗。

5) 将复合光栅按其栅线竖向置于频谱面 (即 P_2 面) 上, 并使其沿垂直光轴方向可水平横向微动 (用一维燕尾平移台来实现), 在观察屏 P_3 上观察目标物图像的变化, 微调复合光栅的横向位置直至找到最好的微分图像。

6) 观察并记录图形的微分效果: 令复合光栅沿水平横向微动时, 可在输出面 P_3 观察到目标物的 ± 1 级像周期地出现图形微分效果, 即 ± 1 级像的图形中心部分变黑, 只剩下相对较亮的边缘部分。

注意: 0 级像应没有微分效果。

7) 改变复合光栅条纹的方向, 重复步骤 5 和 6。

注意: 此时作为目标物的狭缝方向也应相应改变。

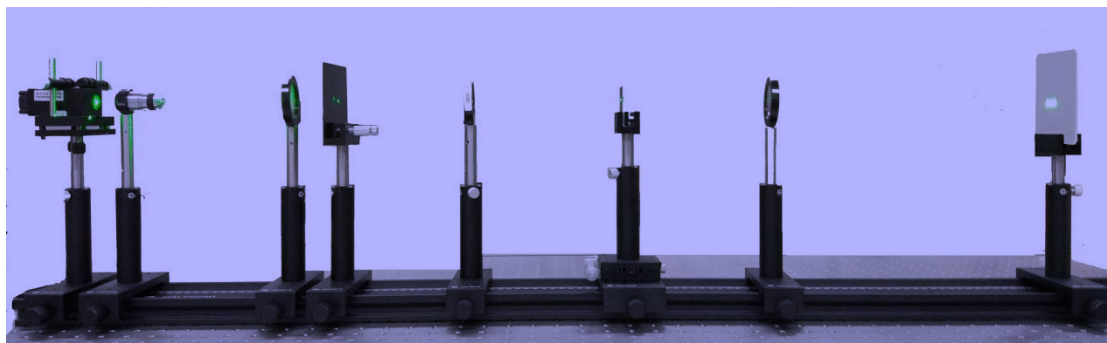


图 7 系统实物图（仅供参考；实验中显微物镜后加针孔组成针孔滤波器效果更好，同时各透镜和目标物的滑块宜装有一维燕尾平移台，两个傅变透镜前后均应为一倍焦距）

【注意事项】

- 1) 实验中如果出现无论怎样调整光栅位置， A_{+1} 和 B_{-1} 的重合处始终无法得到全黑，这可能是由下列原因引起：
 - a. 用于照明图形 A 和 B 的光场不均匀，应重新调整照明光束。
 - b. $4F$ 系统光路不共轴或焦面位置未找准，应重新调整光路。
 - c. 实验数据 ξ_0 、 f 和 b 不能准确匹配，致使 A_{+1} 和 B_{-1} 的中心未能完全重合。
- 2) 在观察周期交替出现图像相加和相减的效果时，光栅相对于光轴的初位相每次只需改变 $\pi/2$ ，相应地光栅移动 $1/4$ 周期，亦即光栅每次所需要的移动量是很小的 ($\Delta=1/4\xi_0=\lambda f/4b$)，因此移动光栅时要小心缓慢地操作。实验时也可使放置光栅的微动平台的微动方向倾斜于光轴的方向，以减缓其变化量。
- 3) 复合光栅方向正确时应观察到 0 级和 ± 1 级三个图像，如果只观察到一个狭缝像，说明复合光栅方向不对（思考：为什么？），或者复合光栅位置太偏（无光栅结构）。

实验五 联合傅里叶变换相关识别实验

1. 引言

联合傅里叶变换 (Joint-Fourier transform) 是重要的相关处理，在指纹识别、字符识别、目标识别等领域已逐步进入实用化阶段。本实验使用空间光调制器实现实时光电混合处理，是典型的近代光学信息处理实验。

2. 实验目的

巩固马赫-曾德干涉系统的搭建和调试，学习电寻址液晶空间光调制器的原理、光学特性和使用，了解联合傅里叶变换在光学上的实现及有关效应，体会利用联合变换相关器进行光学信息图像识别的优越性。

3. 基本原理

- 1) 联合傅里叶变换功率谱的记录：

联合傅里叶变换相关器 (joint-Fourier transform correlator, JTC) 简称联合变换相关器，其基本原理分成两步，第一步是记录联合变换的功率谱，记录光路如图 1 所示。

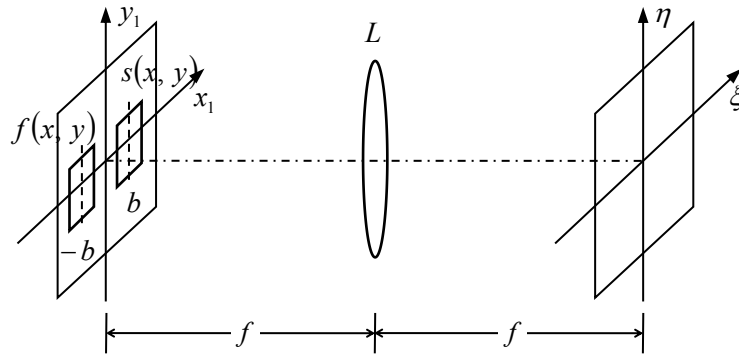


图 1 联合傅里叶变换功率谱的记录

图中 L 为傅里叶变换透镜，焦距为 f 。待识别图像（例如待识别目标、现场指纹等）的透过率为 $f(x, y)$ ，置于输入面（透镜前焦面） x_1 - y_1 的一端，其中心位于 $(-b, 0)$ ；参考图像（例如参考目标、档案指纹等）的透过率为 $s(x, y)$ ，置于输入面的另一端，其中心位于 $(b, 0)$ 。即输入面的复振幅分布为：

$$U_1(x_1, y_1) = s(x_1 - b, y_1) + f(x_1 + b, y_1) \quad (1)$$

用准直的激光束照射输入面，并通过透镜进行傅里叶变换。在频谱面（透镜的后焦面）上的复振幅分布为：

$$U_2(\xi, \eta) = S(\xi, \eta) \exp(-i2\pi b\xi) + F(\xi, \eta) \exp(i2\pi b\xi) \quad (2)$$

式中 F 、 S 分别是 f 、 g 的傅里叶变换。如果用平方律记录介质或用平方律探测器来记录频谱面上的图形，可得到：

$$I_2(\xi, \eta) = |U_2(\xi, \eta)|^2 = |S(\xi, \eta)|^2 + |F(\xi, \eta)|^2 + F^*(\xi, \eta) S(\xi, \eta) \exp(-i4\pi b\xi) + F(\xi, \eta) S^*(\xi, \eta) \exp(i4\pi b\xi) \quad (3)$$

记录下来的谱图像即为联合变换的功率谱。当 $f=s$ （即两个图形完全相同）时，上式化为：

$$|U_2(\xi, \eta)|^2 = 2|S(\xi, \eta)|^2 [1 + \cos(4\pi b\xi)] \quad (4)$$

亦即相同图形的联合变换功率谱为杨氏干涉条纹。

2) 联合傅里叶变换功率谱的相关读出：

联合傅里叶变换相关器基本原理的第二步是联合变换功率谱的相关读出，读出光路如图 2 所示。

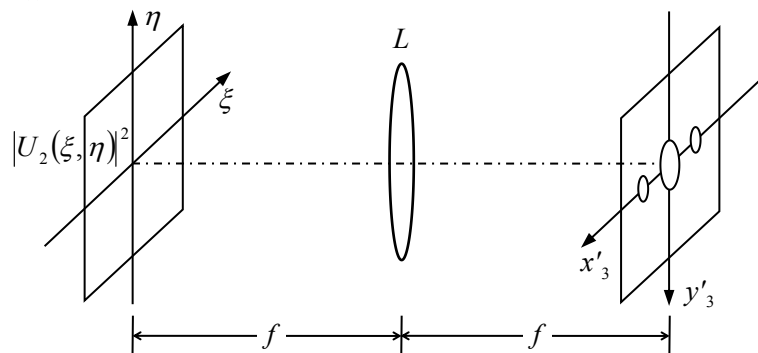


图 2 联合变换功率谱的相关读出

利用傅里叶变换透镜对联合变换功率谱进行第二次傅里叶变换（或逆傅里叶变换，取反演坐标系），则在输出面（透镜后焦面） x'_3 - y'_3 上得到：

$$\begin{aligned}
 U_3(x'_3, y'_3) &= FT^{-1}\{I_2(\xi, \eta)\} \\
 &= s(x'_3, y'_3) \star s(x'_3, y'_3) + f(x'_3, y'_3) \star f(x'_3, y'_3) \\
 &\quad + f(x'_3, y'_3) \star s(x'_3, y'_3) * \delta(x'_3 - 2b, y'_3) + s(x'_3, y'_3) \star f(x'_3, y'_3) * \delta(x'_3 + 2b, y'_3) \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中第一项和第二项分别是 f 和 s 的自相关，重叠在输出面中心附近，形成较亮的 0 级项，但它们不是信号。而第三项和第四项为 f 与 s 的两个互相关项（即 ± 1 级项），这正是所需的相关输出，其中心在输出面上沿 x'_3 轴分别平移到 $2b$ 和 $-2b$ 的位置，因而与 0 级项分离开，便于检测。若 f 和 s 完全相同，则 ± 1 级处的相关输出将呈现明显的亮斑（相关峰）。从物理光学的观点来看，如果 f 和 s 完全相同，联合变换功率谱即为杨氏干涉条纹，其傅里叶变换必然出现一对分离的 ± 1 级亮斑和位于中心的 0 级亮斑；如果 f 和 s 部分相同（例如现场指纹和档案指纹），则相关峰较为暗淡，弥散较大；如果 f 和 s 不同，则相关输出不呈现“峰”的结构。因而相关峰及其锐度是 f 和 s 是否相关以及相关程度的评价指标。

3) 联合傅里叶变换相关器的实时化：

联合变换功率谱的记录和相关读出之间，有一个重要的中介过程，即用平方律介质或器件将联合变换的复振幅分布转换成功率谱（强度分布）。早期的实验中这一过程借助于感光胶片来实现，因而整个相关识别过程是非实时的。近年来，借助于空间光调制器（spatial light modulation, SLM）可使这一过程实时化，因而联合变换相关识别的优越性就体现出来了。用于这一过程的 SLM 有两类，第一类是光寻址的液晶光阀（LCLV），第二类是 CCD 和电寻址空间光调制器的结合，例如磁光空间光调制器（MOSLM）和液晶显示器（LCD，早期称为液晶电视 LCTV，参见《附录》）。

本实验采用高分辨率 CCD 和液晶显示器 LCD 的组合。在第一步（联合傅里叶变换功率谱的记录）中用 CCD 探测联合变换功率谱，并将其转换为 LCD 的透过率分布；第二步（联合傅里叶变换功率谱的相关读出）对 LCD 的透过率函数进行第二次傅里叶变换，并用第二个 CCD 来探测相关输出。功率谱和相关输出分别显示在两个显示器上。

若 CCD 的线度（例如宽度） A' 与 LCD 的线度（例如宽度） A'' 不相等，记录和读出过程中傅里叶透镜的焦距 f' 和 f'' 不相等，可以证明相关输出中相关峰的平移量 $2b$ 变为：

$$\Delta = \frac{f''}{f'} \cdot \frac{A'}{A''} \cdot 2b \quad (6)$$

4. 实验仪器及用具

序号	型号	名称	重要指标	数量
1	DH-HN250	He-Ne 内腔激光器	632.8 nm, 2 mW	1
2	GCM-181101M	激光管夹持器		1
3	GCO-0704M	圆形可调衰减器		1
4	GCO-01M	空间滤波器	含 25 μm 针孔	1
5	GCL-010223	双凸透镜+镜架	$\Phi 30, f150$	1
6	GCC-411201	分光光楔+镜架	5:5 分, $\Phi 50$	3
7	GCC-101054	单波长介质膜反射镜+镜架	$\Phi 40, 632.8 \text{ nm}$	3
8	GCO-0201M	傅里叶变换透镜+镜架	$\Phi 50, f300$	2

9	GCI-770101	空间光调制器	1024*768	1
10	GCL-050002	偏振片+偏振片架	Φ25.4	2
11	GCM-5701M	小孔光阑	2~29	1
12		观察屏+干板架		1
13	GCI-050103	CCD	PK01	2
14	GCSM-660101	CCD 光阑		2
15	GCM-540402	螺孔转接头	M6 to 1/4-20	2
16	GCSL-020201	目标识别物板+干板架		2
17	GCM-420102M	磁性表座	含转接板	2
18	GCM-150101M	齿轮齿条一维台		2
19		支杆+套筒+磁性表座	L102/L76/L51	若干
20	GCSI-840502	图像卡	DH-CG300	1
21		微型计算机	安装图像卡驱动及软件	1
22	GCI-1601	黑白监视器	9 寸	1
23	GCSI-810302	直流电源	12 V	2
24	GCSI-850104	信号引线	Q9---Q9	2
25	GCSI-870102	视频信号分频器	含 15 针接线两根	1
26		卷尺或钢尺		1

5. 实验内容及步骤（整体光路参见图 3）

1) 调节 He-Ne 激光管的夹持器，令激光束 1 的高度适中，并调节水平（与台面平行），作为主光轴（中心高）。

2) 调整所有光学元件（分光光楔、反射镜、空间滤波器、透镜等）使它们的中心与光轴重合，即共轴。

3) 放置圆形可调衰减器 2，用于调节光路中激光束的强度（初始调光路时先调到最强）。

4) 利用空间滤波器 3 进行扩束，并通过调节针孔进行滤波，使扩束形成亮度均匀柔和的圆形光斑。

5) 放置透镜 4 进行光束准直。由于准直透镜的焦距为 150 mm，该透镜应放在针孔后 150 mm 左右的位置，用白纸在准直透镜后记录下光斑的大小，然后在较远的位置再次记录光斑的大小，如不一致时需前后调整准直透镜 4 的位置，直到远近光斑大小基本一致。

6) 放置可变光阑 5 到光斑中心，将光斑直径大小限制在 10 mm 左右。

7) 用分光光楔 6 将光束分成两束，即光路 I（透射光）和 II（反射光），并使其互成直角。

在光路 I 中调整：

8) 利用两个分光光楔 7、12 和两个反射镜 8、9 搭建马赫-曾德干涉系统：通过分光光楔 7 分光，用反射镜 8、9 分别反射到分光光楔 12 处，使两束光合二为一；分别调节元件 9、12 的二维俯仰，使通过分光光楔 12 出射的两束光的光斑在近、远处都要重合在一起（调整反射镜 9 俯仰使打到分光光楔 12 上的两个光斑重合，调整光楔 12 俯仰使远处的光斑重合，依次反复调整）。

9) 在马赫-曾德干涉光路的两个臂内分别放置两片目标识别物板 10、11，两块识别物板到分光光楔 12 的距离要相等，而且两块板的左右要相反（因为目标

识别物板 10 相对光楔 12 为镜面反射)。

10) 放置傅里叶变换透镜 13, 距离识别物板 11 的距离等于傅变透镜 13 的焦距。

11) 在傅里叶变换透镜 13 的后焦面位置放置 CCD14, 并连接到已安装图像采集卡的电脑 15 上, 通过图像采集软件观测 CCD14 拍摄到的图像。分别将两目标物识别板上的相同字符移动到光斑中, 再调节圆形可调衰减器 2 使光路中的激光束强度减弱, 即可在电脑 15 上看到清晰的联合傅里叶变换功率谱 (即两衍射斑之间的干涉条纹); 如果分别将两目标物识别板的不同字符移动到光斑中, 则看不到清晰的功率谱。

在光路 II 中调整:

12) 利用视频信号分频器将电脑 15 的视频信号输入空间光调制器 17。

13) 在空间光调制器 17 前后各放一个偏振片 16、18, 并调节使其偏振方向基本一致 (此时相关图像效果最佳)。

14) 在偏振片 18 后面放置傅变透镜 19, 且透镜 19 到空间光调制器 17 的距离等于透镜 19 的焦距。

15) 在傅变透镜 19 的后焦面上放置 CCD20, 并连接到另一台电脑 21, 此时如果待识别的是两个相同字符, 则可在屏幕上看到一对清晰锐利的相关峰点 (± 1 级位置), 否则相关峰的锐度变差 (暗淡弥散), 相关峰可随两字符的相对移动而移动。实验过程中可依次对比两片目标物识别板上的“大-大”、“圆孔-圆孔”、“恒-恒”、“大-恒”等, 还可以检验两个“大”字有一夹角或两个“恒”字左右相反放置的情况。

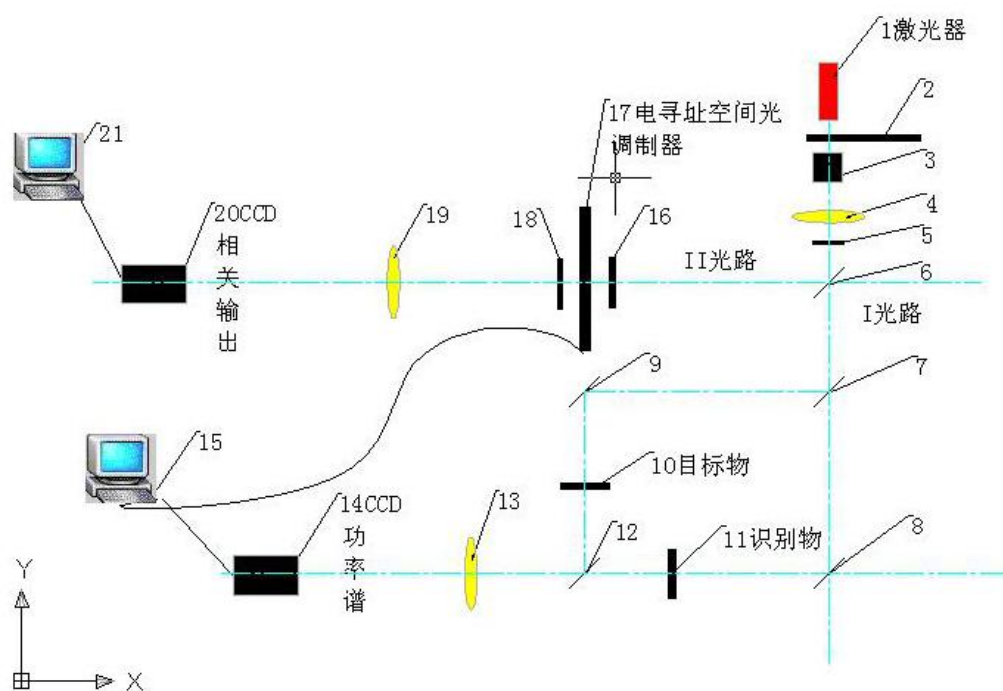


图 3 系统光路图

6. 思考题

1) 系统光路 (图 3) 中将目标物和识别物分别置于马赫-曾德干涉系统的两个臂内, 这与原理图 (图 1) 中将它们对称置于傅里叶变换透镜输入面上的情形

原理上是一样的吗？

2) 实验观察的现象很容易受到周围环境振动（如人的走动）的影响，这是为什么？如果某些光学元件不干净，则在光斑上可以看到很多不规则的斑点或环状结构，这又是怎么产生的？

3) 扩束物镜和针孔组成的空间滤波器的作用是什么？能否结合本课程所学的空间滤波知识作简要说明？

注：以上思考题至少选择一个在实验报告中回答，同时报告中应注意详细阐述实验观察到的现象（如放置不同目标物和识别物时、同一目标物和识别物之前有角度时等）以及相应的分析思考。

附录

空间光调制器 (SLM) 与液晶显示器 (LCD)

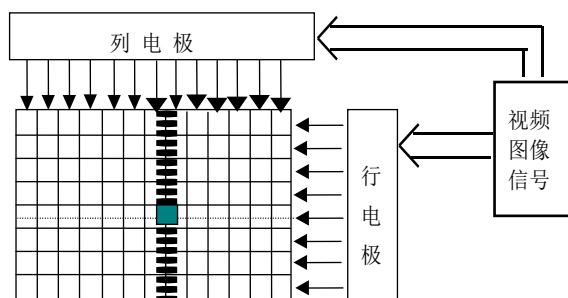
1. 空间光调制器的定义和寻址方式

空间光调制器是一个二维器件，可以看成是一个透过率（或反射率）受到写入信号控制的滤光片，可表示为：

$$T(x, y) = T[x(t), y(t)]$$

$T[x(t), y(t)]$ 表示在时刻 t ，空间光调制器在 (x, y) 处的复数透过率（或反射率）。写入信号把信息传递到 SLM 上相应位置，以改变 SLM 的透过率分布的过程，称为“寻址” (addressing)。

SLM 的寻址方式通常有两种，对应于两类空间光调制器。当写入信号是电信号（通常是视频信号或计算机的电平信号）时，采用电寻址的方法来控制 SLM 的复数透过率。常用的电寻址的方式是通过 SLM 上两组正交的栅状电极，用逐行扫描的方法，把信号加到对应的单元上去。电寻址又称为矩阵寻址，一对相邻的行电极和一对相邻的列电极之间的区域构成 SLM 的最小单元，又称像素 (pixel)，它给出 SLM 的分辨率极限。矩阵寻址示意图见图附 1。



图附 1 矩阵寻址

2. 空间光调制器的主要指标

1) 空间截止频率

设像素线度为 δ ，根据抽样定律，器件的最高空间频率：

$$\nu = \frac{1}{2\delta}$$

它也是器件的带宽或传递函数的截止频率。

2) 空间带宽积

设器件线度为 Δx 、 Δy ，则空间带宽积：

$$SBP = \Delta x \Delta y \cdot \nu_x \nu_y = \frac{\Delta x \Delta y}{4\delta_x \delta_y} = \frac{N_x N_y}{4} = \frac{N}{4}$$

式中 N 为像素数。空间带宽积是信道容量的标志，因而像素数（即图像的抽样数）是器件的重要指标。表附 1 给出常用的像素数。

表附 1

VGA	640×480
SVGA	800×600
XGA	1024×768
SXGA	1280×1024
UXGA	1600×1200

3) 开口率

开口率 (fill factor) 为像素的有效通光面积与像素总面积之比, 透射式 SLM 由于电极和薄膜晶体管电路本身不透明, 所以开口率较低, 光能利用率不高。

4) 响应时间

3. 空间光调制器的物理效应和常用的空间光调制器

一般来说, 凡是能引起介质光参数改变的效应都能应用于空间光调制器, 例如线性电光效应 (Pockels 效应), 光弹效应, 光电导效应, 磁光效应, 声光效应, 光折变效应等等。由于空间光调制器是相干光和非相干光处理的关键器件, 因此近年来国际国内开发出几十种空间光调制器。

常用的电寻址空间光调制器有以下几种:

- 1) 薄膜晶体管液晶显示器 (thin-film-transistor liquid crystal display, TFT-LCD);
- 2) 磁光空间光调制器 (magneto-optical SLM, MOSLM);
- 3) 数字微反射镜器件 (digital micromirror device, DMD);
- 4) 反射式液晶显示器 (liquid-crystal-on-silicon, LCOS);

常用的光寻址空间光调制器有以下几种:

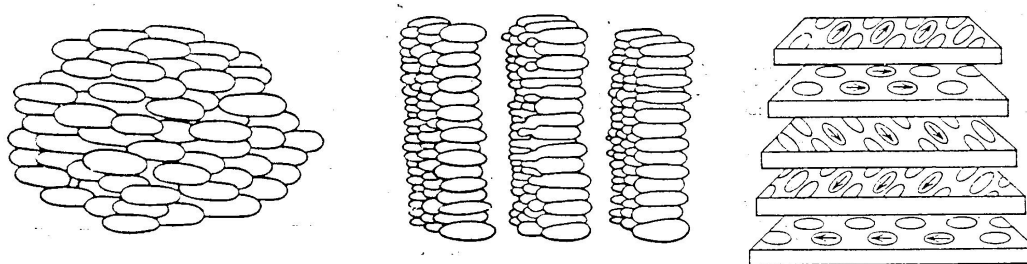
- 1) 铁电液晶空间光调制器 (ferroelectric liquid crystal SLM, FLC-SLM);
- 2) 液晶光阀 (liquid crystal light valve, LCLV) 及液晶显示器-液晶光阀 (LCD-LCLV);
- 3) 微通道板空间光调制器 (microchannel SLM, MSLM);
- 4) Pockels 光调制器 (Pockels readout optical modulator, PROM)。

4. 液晶显示器 (LCD)

1) 液晶:

液晶是有机高分子物质在一定条件下呈现的一种特殊的物质状态, 其结构介于液体和固体之间, 称为中间态, 或中间相。液晶分子为长棒状、盘状、碗状, 分子排列介于完全规则的晶体和各向同性的液体之间, 具备以下特点:

- a. 每个液晶分子的中心在液晶空间中的分布是随机的;
- b. 分子的取向具有有序性: 长棒状分子的长轴方向或盘状、碗状分子的法线方向在一定的温度范围内倾向于彼此平行, 该方向称液晶分子的指向矢量方向。三种重要的液晶结构见图附 2。

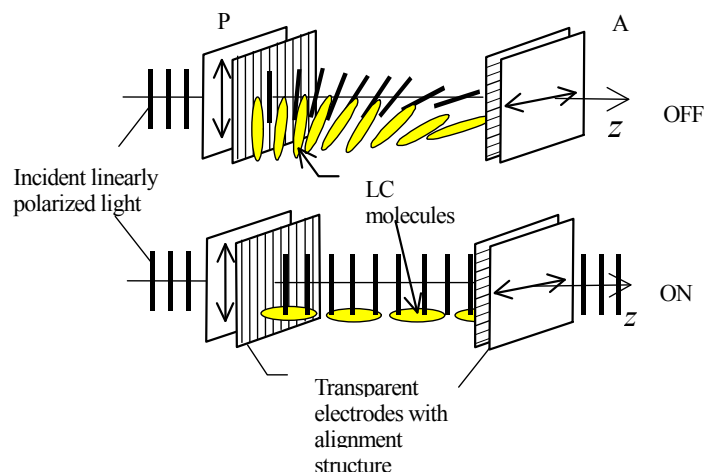


图附 2 三种重要的液晶分子示意图
(a)向列相 (b)层列相 (c)胆甾相

液晶具有双重性质：既具有液体的流动性，又具有晶体所特有的各向异性。液晶的各向异性在外场下会发生显著变化，这种变化远比各向异性晶体强烈。KDP 晶体的半波电压 9.3 kV，BSO 晶体的半波电压为 3.9 kV ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)，而液晶电光效应的特征参量——开关电压约为 5 V，比晶体半波电压小三个数量级。液晶作为调制介质，可构成低能耗、低电压的空间光调制器——光寻址的液晶光阀 (LCLV) 和电寻址的薄膜晶体管驱动液晶显示器 (TFT-CCD)。

2) 偏振光在扭曲介质中的传播：

如果把向列相液晶放在一个经特殊处理的盒中，可以构成具有特殊的扭曲效应的液晶盒——TN 液晶盒，其结构见图附 3。液晶注入一对经过特殊处理的导电玻璃 ITO 之间，这两片导电玻璃的表面具有定向的结构，左右导电玻璃的定向结构方向正交。在表面定向结构的作用下，接近该表面的液晶分子的指向矢趋向于 ITO 表面结构的方向排列。在液晶盒中，分子的排列逐渐旋转，直至右表面，正好旋转了 90 度，使右表面层分子的指向矢趋向于导电玻璃 ITO2 的定向结构的方向。



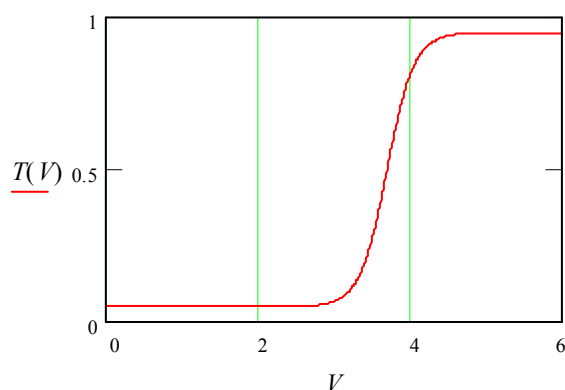
图附 3 TN 液晶盒的结构和工作原理
(上图) 未加电压；(下图) 加电压

在整个液晶层中，分子长轴发生旋转，光轴也就随之旋转，形成扭曲型各向异性介质。理论上可以证明，由于扭曲型各向异性的作用，当入射线偏振光的振动方向与扭曲介质表面的局部光轴一致时，振动方向将锁定在光轴的方向上，随着光轴旋转，出射光波仍是线偏振光，振动方向与扭曲介质出射表面的光轴一致。这就是偏振光在扭曲介质中传播时的扭曲效应。如果检偏器光轴与出射偏振光正

交，则 TN 器件的透过率为零；反之若检偏器光轴沿出射光振动方向，则 TN 器件的透过率为最大，这两种状态分别称 TN 液晶盒的关态（暗态）和开态（亮态）。扭曲效应本来就是近似的，通常旋转角并不严格等于 90° ，光波在液晶中传播时，液晶中的不均匀还会引起散射，出射光波一般是长椭圆偏振光或部分偏振光，这些因素引起 TN 盒在暗态下的漏光，造成对比度下降。

3) 扭曲向列液晶盒的工作原理

当我们在 TN 盒上通过透明电极加上纵向电压时，液晶的长形分子作为电偶极子，将趋向于电场方向重新排列。边界附近的分子由于边界的定向作用，受电场的影响较小；中间层的分子受电场的影响最大。这样一来，就一定程度上抵消了扭曲效应，使器件产生一定的透过率。电压越高，趋向于电场方向排列的分子越多，扭曲效应越弱，透过率就越高。一般 TN 盒在 5 V 的外加电压下就达到最大的透过率—开态（亮态）。TN-LCD 的电光特性如图附 4 所示。这样一来，外加的电信号就转换成 TN 盒的透过率变化，这正是电寻址液晶空间光调制器的基本原理。



图附 4 TN-LCD 的电光特性曲线
 $T(V)$: 相对透过率; V : 外加电压