

《光学测试技术》实验指导书

深圳大学光电工程学院
2016年12月

目录

实验一 光散斑的性质及测试实验	1
实验二 面内位移的散斑测量实验	4
实验三 物体形变的散斑测量实验	6
实验四 激光干涉精密测量实验	9
实验五 激光衍射计量技术实验	12
实验六 巴俾特原理及细丝直径测量实验	15
实验七 激光共焦三维测量实验	17
实验八 光学傅里叶变换及图像处理方法实验	20

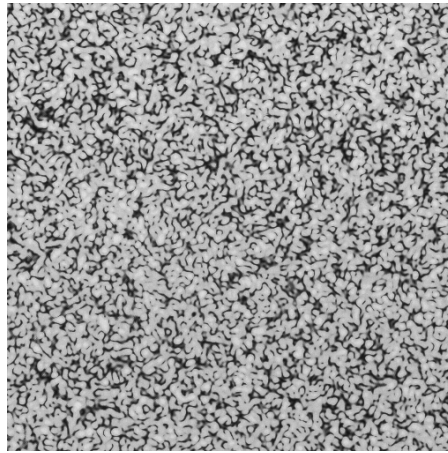
实验一 光散斑的性质及测试实验

一、 实验目的

1. 了解散斑的性质及特点
2. 掌握散斑的测试方法

二、 实验原理

激光散斑的基本概念：激光自散射体的表面漫反射或通过一个透明散射体（例如毛玻璃）时，在散射表面或附近的光场中可以观察到一种无规分布的亮暗斑点，称为激光散斑（Laser Speckles）或斑纹。如果散射体足够粗糙，这种分布所形成的图样是非常特殊和美丽的（对比度为 1）。



激光散斑是由无规散射体被相干光照射产生的，因此是一种随机过程。要研究它必须使用概率统计的方法。通过统计方法的研究，可以得到对散斑的强度分布、对比度和散斑运动规律等特点的认识。

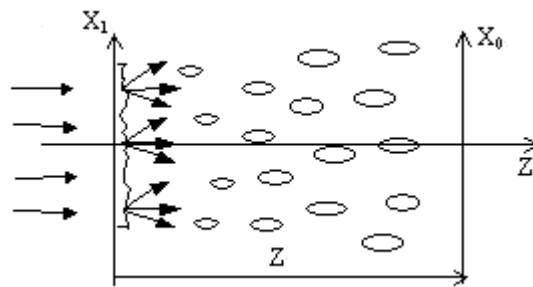


图 1 光散斑的产生(图中为透射式，也可以是反射式的情形)

图 1 说明激光散斑具体的产生过程。当激光照射在粗糙表面上时，表面上的每一点都要散射光。因此在空间各点都要接受到来自物体上各个点散射的光，这些光虽然是相干的，但它们的振幅和位相都不相同，而且是无规分布的。来自粗糙表面上各个小面积元射来的基元光波的复振幅互相迭加，形成一定的统计分布。颗粒的大小，可用它的平均直径来表示，而颗粒尺寸的严格定义是两相邻亮斑间距离的

统计平均值。此值由产生散斑的激光波长 λ 及粗糙表面圆形照明区域对该散斑的孔径角 u' 所决定，即

若经过一个光学系统，在它的像平面上形成的散斑，称为成像散斑，则

$$\sigma_r = \frac{0.62\lambda}{\sin u'} = \frac{0.62\lambda}{NA}$$

在斑干涉技术中，常常应用成像散斑来进行测量。

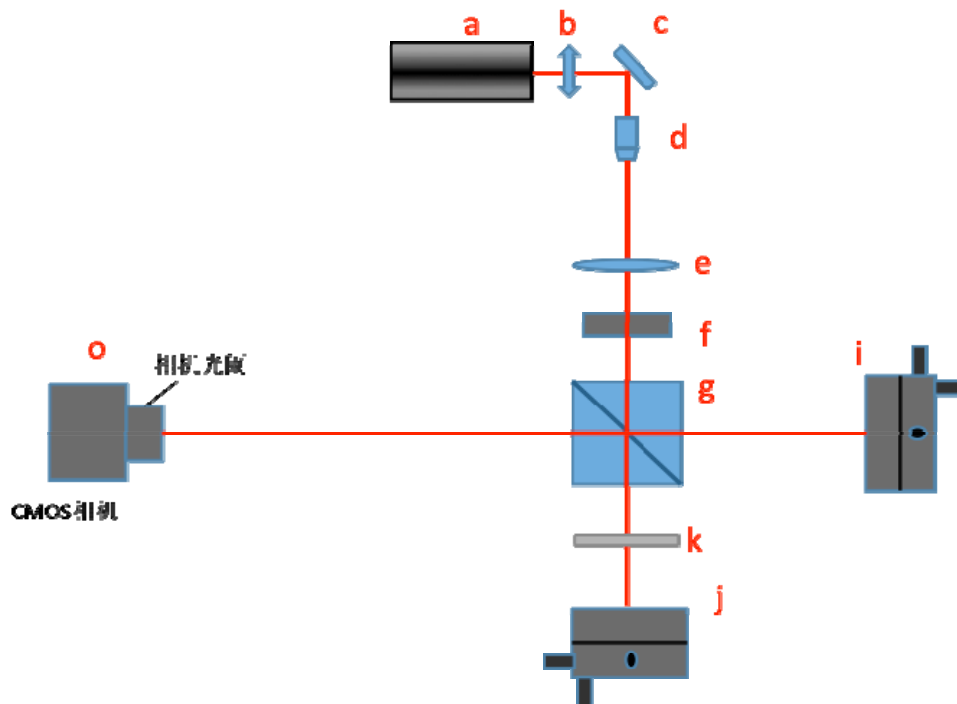
散斑的基本性质：

1. 散斑与均匀场的相干结合，散斑图与相应的单独散斑图分布差别不大，只是全暗光斑较少一些
2. 散斑与均匀场的不相干叠加，没有全暗散斑
3. 两个散斑场的相干相加，散斑的大小没有明显变化
4. 两个散斑场的非相干相加，没有全暗光斑

三、 实验器材

光电实验平台、电脑

四、 实验光路图



a-激光器，b-衰减片，c-反射镜，d-显微物镜，e-准直透镜，f-可变光阑，g-分光棱镜，k-衰减片，i, j-反射机构

五、 实验步骤

1. 开机，激光器 a 通电，待光强稳定；
2. 按实验光路图布置好光路，扩束激光；
3. 在反射机构 i, 上安装反射镜；

4. 调节反射机构及分光棱镜，使得激光照射进数字相机 o；
5. 运行实验软件，选择实验一，点击“采集”，使得数字相机工作，移动数字相机 o，使散斑图案清晰；
6. 更换反射机构 i 上的反射器件（反射镜，铜片，铝片），观察散斑图案，并保存记录；

材质	散斑图
铜片散斑图	
铝片散斑图	

实验二 面内位移的散斑测量实验

一、 实验目的

1. 掌握散斑测量平面位移的基本原理
2. 进行面内位移的散斑测量，对散斑测量形成定性认识

二、 实验原理

当物体发生位移时，引起前方空间散斑场分布的变化，通过测量散斑场的变化，从而得到物体位移的相关信息。测量面内位移的原理见图 1。实际测量时，以单束激光 S 照射物体 U 的表面，在物体前方空间将充满散斑，取相机靶面平行物平面的位置。当物体发生位移时，空间散斑颗粒也发生位移，则空间散斑在数字相机靶面上也同样发生位移，在电脑中分别记录下物体位移前后的空间散斑图。在位移前散斑图上，取散斑某子区，将其在位移后的数字散斑图上进行相关搜索，由相关系数的最大值求出位移值。

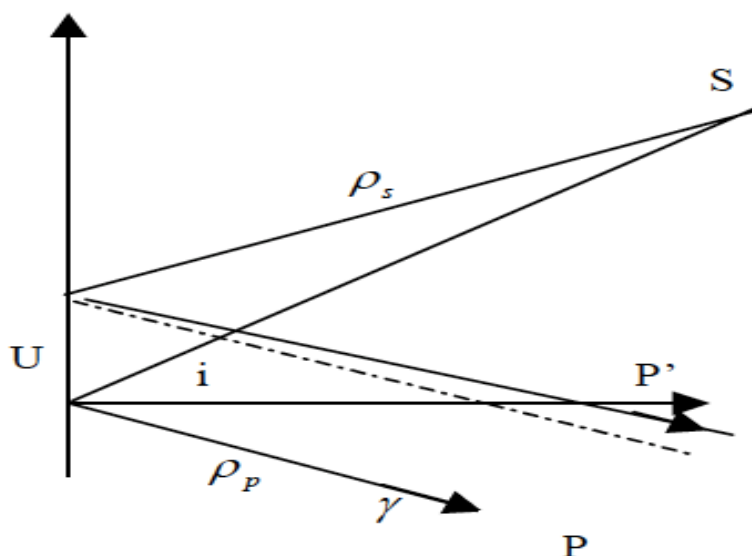
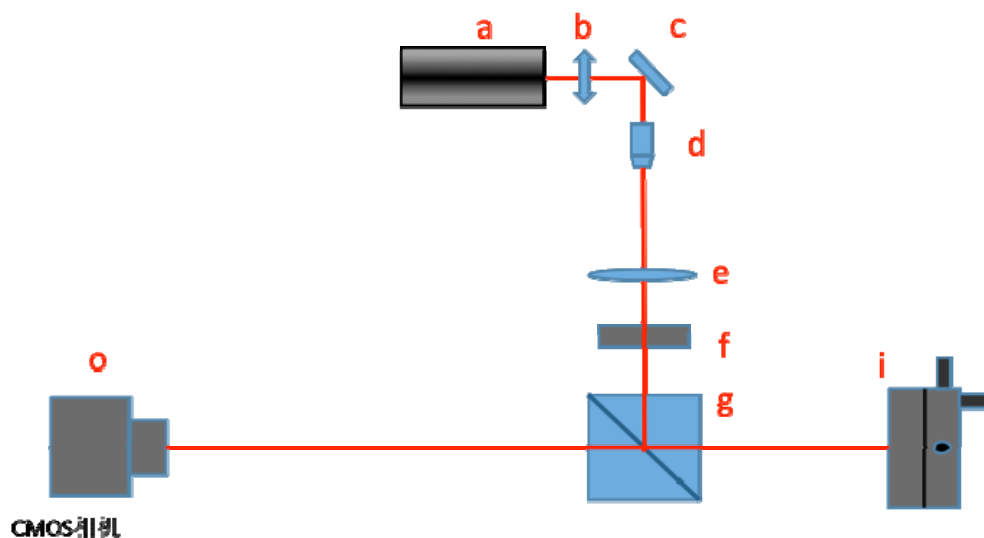


图 1 散斑面内位移测量原理图

三、 实验器材

光电实验平台、电脑

四、 实验光路图



a-激光器，b-衰减片，c-反射镜，d-显微物镜，e-准直透镜，f-可变光阑，g-分光棱镜，i-反射机构，o-数字相机

五、 实验步骤

1. 开机，激光器 a 通电，待光强稳定；
2. 按实验光路图布置好光路，扩束激光；
3. 在反射机构 i, 上安装反射镜；
4. 调节反射机构及分光棱镜，使得激光照射进数字相机 o；
5. 运行实验软件，选择实验二，点击“采集”，使得数字相机工作，移动数字相机 o，使散斑图案清晰；
6. 将反射机构 i 上的反射器件替换为铝片，观察散斑图案，并保存图片；
7. 向任意方向轻移反射器件，观察散斑图案，并保存图片
8. 点击“数据处理”，在软件数据处理界面，分别点击“读取原始图像”、“读取位移图像”，选择开始保存的位移前后两幅图。点击“原始图像”“位移图像”按键可以分别观察读入图片是否正确。
9. 点击“散斑计算”，记录计算出的结果。
10. 重复 6-9，多测几组数据并记录。

实验三 物体形变的散斑测量实验

一、 实验目的

1. 了解电子散斑干涉原理
2. 进行形变的散斑测量

二、 实验原理

测量形变的原理见图 1。M1 是被测面，反射后的激光为物光， M2 是参考面，反射后的激光为参考光。物光和参考光在像面 PP₁上形成散斑干涉图。

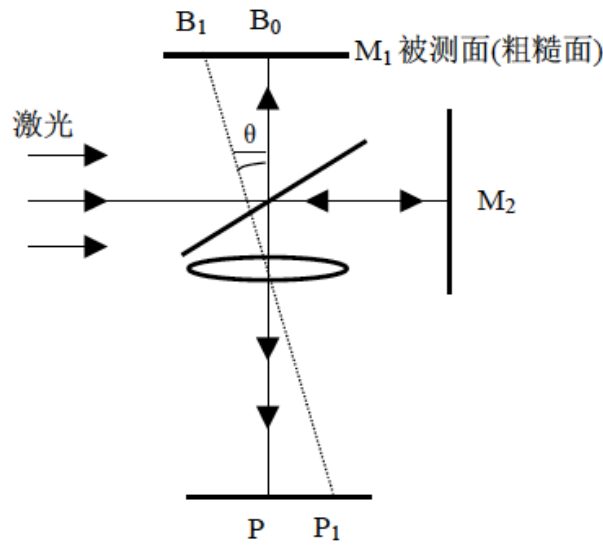


图 1 形变测量原理图

物光的光强分布为：

$$U_o(r) = u_o(r) \exp \Phi_o(r) \quad (1)$$

其中 $u_o(r)$ 是光波的振幅， $\Phi_o(r)$ 是经物体漫射后的物体光波的相位。

参考光的光强分布为：

$$U_R(r) = u_R(r) \exp \Phi_R(r) \quad (2)$$

物光与参考光在 CCD 靶面上汇合形成光强 $I(r)$ 为：

$$I(r) = u_o^2 + u_R^2 + 2u_o u_R \cos(\phi_o - \phi_R) \quad (3)$$

当被测物体发生变形后，表面各点的散斑场振幅 $u_o(r)$ 基本不变，而位相 $\phi_o(r)$ 将改变为 $\phi_o(r) - \Delta\phi(r)$ ，即

$$U'_o = u_o(r) \exp[\phi_o(r) - \Delta\phi(r)] \quad (4)$$

其中 $\Delta\Phi(r)$ 为由于物体变形产生的相位变化。

变形前后的参考光波维持不变。这样，变形后的合成光强 $I'(r)$ 为：

$$I'(r) = u_o^2 + u_R^2 + 2u_o u_R \cos[\phi_o - \phi_R - \Delta\phi(r)] \quad (5)$$

对变形前后的两个光强进行相减处理：

$$\begin{aligned}
I &= |I'(r) - I(r)| \\
&= \left| u_o^2 + u_R^2 + 2u_o u_R \cos[\phi_o - \phi_R - \Delta\phi(r)] - [u_o^2 + u_R^2 + 2u_o u_R \cos(\phi_o - \phi_R)] \right| \\
&= \left| 4u_o u_R \sin\left[(\phi_o - \phi_R) - \frac{\Delta\phi(r)}{2}\right] \sin \frac{\Delta\phi(r)}{2} \right| \quad (6)
\end{aligned}$$

由式(6)可见,相减处理后的光强是一个包含有高频载波项 $\sin\left[(\phi_o - \phi_R) - \frac{\Delta\phi(r)}{2}\right]$ 的低频条纹 $\sin \frac{\Delta\phi(r)}{2}$ 。该低频条纹取决于物体变形引起的光波相位改变。

这个光波相位变化与物体变形关系从光波传播的理论可以推导出来,即有:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [d_1(1 + \cos\theta) + d_2 \sin\theta] \quad (7)$$

其中 λ 是所用激光波长, θ 是照明光与物体表面法线的夹角, d_1 是物体变形的离面位移, d_2 是物体变形的面内方向位移。

为了使光路对离面位移敏感,应该使照明角 θ 比较小,即 $\cos\theta \approx 1, \sin\theta \approx 0$, 则由(7)式可以得到:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_1 \quad (8)$$

有(6)式可知,在暗条纹处,

$$\Delta\phi = 2k\pi \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可得到:

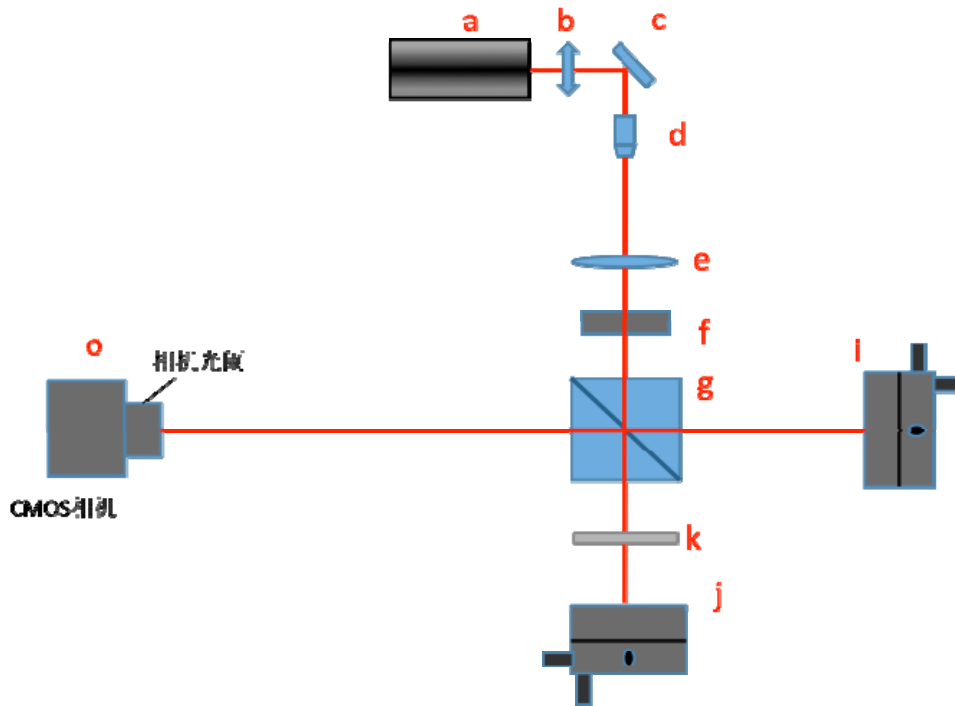
$$d_1 = \frac{k\lambda}{2} \quad (10)$$

即暗条纹处的离面位移是半波长的整数倍。

三、 实验器材

光电实验平台、电脑

四、 实验光路图



a-激光器，b-衰减片，c-反射镜，d-显微物镜，e-准直透镜，f-可变光阑，g-分光棱镜，k-衰减片，i, j-反射机构，o-数字相机

五、 实验步骤

1. 开机，激光器 a 通电，待光强稳定；
2. 按实验光路图布置好光路，扩束激光；
3. 在反射机构 i, j 上安装反射镜；
4. 调节反射机构及分光棱镜，使得激光照射进数字相机 o；
5. 运行实验软件，选择实验三，点击“采集”，使得数字相机工作，移动数字相机 o，使散斑图案清晰；
6. 更换反射机构 i 上的反射器件（铜片或者铝片），在参考光光路加入衰减器件 k，适当调节被测物角度，使得物光和参考光光强大致相等，观察散斑图案，采集并保存此时相机上的图像；
7. 微调被测物角度，采集并保存变化后相机上的图像；
8. 重复上步骤 5 次，进入到实验软件数据处理界面；
9. 单击“原始图样”，按照路径选择原始图片，再点击“位移图样”，按照路径选择微调后图片；
10. 单击“散斑计算”，进行计算。所得到的偏转角为被测物旋转角度的绝对值。

实验四 激光干涉精密测量实验

一、 实验目的

1. 了解激光干涉测量的原理
2. 掌握微米及亚微米量级位移量的激光干涉测量方法
3. 了解激光干涉测量方法的优点和应用场合

二、 实验原理

本实验采用泰曼-格林 (Twyman-Green) 干涉系统, T-G 干涉系统是著名的迈克尔逊白光干涉仪的简化。用激光为光源, 可获得清晰、明亮的干涉条纹, 其原理如图1 所示。

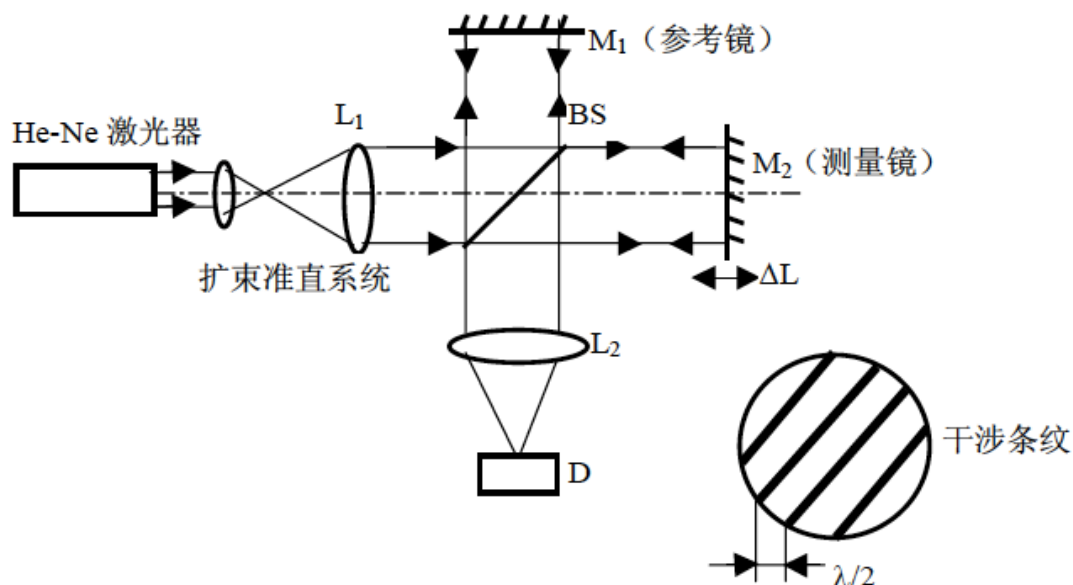


图1 泰曼-格林 (Twyman-Green) 干涉系统

激光通过扩束准直系统 L_1 提供入射的平面波 (平行光束)。设光轴方向为 Z 轴, 则此平面波可用下式表示:

$$U(Z) = Ae^{ikz} \quad (1)$$

式中, A ——平面波的振幅, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 是激光波长。

此平面波经分光系统 BS 分为二束, 一束经参考镜 M_1 , 反射后成为参考光束, 其复振幅 U_R 用下式表示

$$U_R = A_R \cdot e^{i\phi_R(z_R)} \quad (2)$$

式中 A_R ——参考光束的振幅, $\phi_R(z_R)$ ——参考光束的位相, 它由参考光程 z_R 决定。另一束为透射光, 经测量镜 M_2 反射, 其复振幅 U_t , 用下式表示:

$$U_t = A_t \cdot e^{i\phi_t(z_t)} \quad (3)$$

式中 A_t ——测量光束的振幅， $\phi_t(z_t)$ 测量光束的位相，它由测量光程 z_t 决定。此二束光在BS 上相遇，由于激光的相干性，因而产生干涉条纹。干涉条纹的光强 $I(x, y)$ 由下式决定

$$I(x, y) = U \cdot U^* \quad (4)$$

式中 $U = U_R + U_t$ ， $U^* = U_R^* + U_t^*$ ，而 U^* ， U_R^* ， U_t^* 为 U ， U_R ， U_t 的共轭波。

当两束光彼此间有一交角 2θ ，并将式(2)，式(3)代入式(4)，且当 θ 较小，即 $\sin\theta \cong \theta$ 时，经简化可求得干涉条纹的光强为：

$$I(x, y) = 2I_0(1 + \cos kl2\theta) \quad (5)$$

式中 I_0 ——激光光强， l ——光程差， $l = z_R - z_t$ 。

式(5)说明干涉条纹由光程差 l 及 θ 来调制。当 θ 为一常数时，干涉条纹的光强如图2 所示。

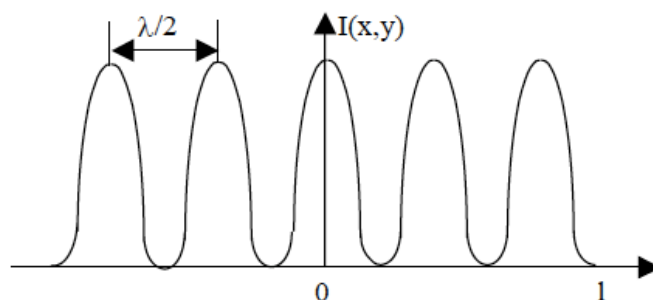


图2 干涉条纹光强分布图

当测量在空气中进行，且干涉臂光程不大，略去大气的影响，则

$$l = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

式中 N ——干涉条纹数。

因此，记录干涉条纹移动数，已知激光波长，有式(6)即可测量反射镜的位移量，或反射镜的轴向变动量。

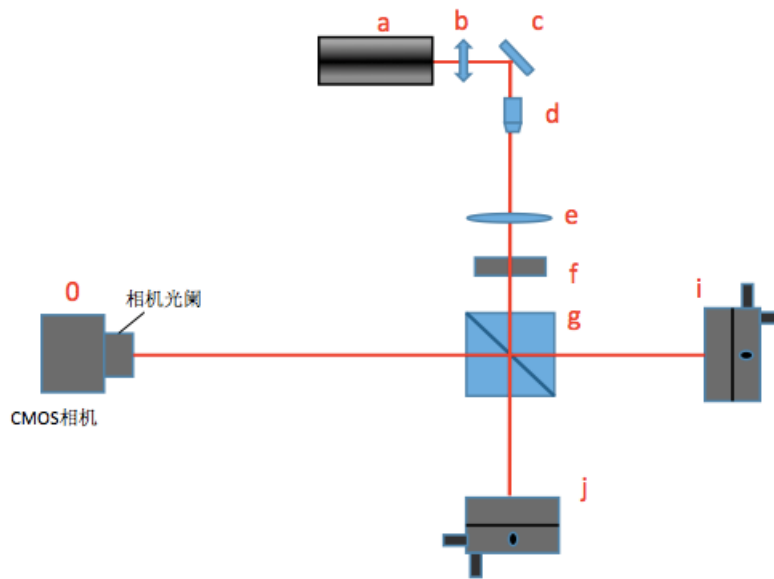
测量灵敏为：当 $N=1$ ，则 $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$ ， $\lambda = 0.633\mu m$ (He-Ne激光)，则 $\Delta l = 0.3\mu m$

如细分 N ，一般以 $1/10$ 细分为例，则干涉条纹的最高测量灵敏度为 $\Delta l = 0.03\mu m$ 。

三、 实验仪器

光电实验平台，电脑

四、 实验光路图



a-激光器，b-衰减片，c-反射镜，d-显微物镜，e-准直透镜，f-可变光阑，g-分光棱镜，i-反射机构（带PZT），j-反射机构，o-数字相机

五、 实验步骤

1. 开机，激光器 a 通电，待光强稳定。按下实验箱前方右侧 PZT 电源键，工作时开关亮蓝灯，；
2. 按实验光路图布置好光路，扩束激光；
3. 在反射机构 i, j 上安装反射镜；
4. 调节反射机构及分光棱镜，使得两束激光重合发生干涉；
5. 调节光路，使得干涉条纹为竖直干涉条纹；
6. 运行实验软件，选择实验四，用相机采集观察干涉条纹，根据电脑性能选择合适的图像分辨率，当电脑配置较低时，建议窗口分辨率设为 512×512 ，避免数据处理时间过长。
7. 调节光路，使得视场内的竖直条纹数在 $6 \sim 20$ 条之间。
8. 点击“打开”按键，通过 COM 孔连接 PZT，拖动“滑块”或者在手动输入定点电压值，观察随着电压值增大，条纹向哪个方向移动（“左”或者“右”）。
9. 设定电压“起始值”、“间距”、“次数”，如起始值 0V，间距 5V，次数 10。点击“执行”，则 PZT 从 0V 开始，每次电压增加 5V，增加 10 次，每增加一次电压采集一幅条纹图像，加上初始图像，共采集 11 幅图像控制。点击“执行”时，会要求选择图像保存位置及图像文件名。
10. 图像采集完毕后，进入数据处理模块，点击打开图像，批量导入刚保存的图像组。根据步骤 8 观察到的条纹移动方向，选择“向左”或“向右”。
11. 点击计算条纹，经过系统计算，便可得到电压与 PZT 移动量之间的对应关系。保存相关图标及表格。

实验五 激光衍射计量技术实验

一、实验目的

1. 了解激光衍射计量原理
2. 利用间隙计量法测量缝宽

二、实验原理

激光衍射计量的基本原理是利用激光下的夫朗和费衍射效应。夫朗和费衍射是一种远场衍射。衍射计量是利用被测物与参考物之间的间隙所形成的远场衍射来完成。当激光照射被测物与参考的标准物之间的间隙时，这相当于单缝的远场衍射。当入射平面波的波长为 λ ，入射到长度为 L ，宽度为 w 的单缝上 ($L > w > \lambda$)，并与观察屏距离 $R \gg \frac{w^2}{\lambda}$ 时，在观察屏 E 的视场上将看到十分清晰的衍射条纹。

图 1 是计量原理图，图 2 是等效衍射图。在观察屏 E 上的由单缝形成的衍射条纹，其光强 I 的分布由物理光学知道有：

$$I = I_0 \left(\frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \right)$$

式中： $\beta = \left(\frac{\pi w}{\lambda} \right) \sin \theta$ ， θ 为衍射角， I_0 是 $\theta = 0^\circ$ 时的光强，即光轴上的光强度。

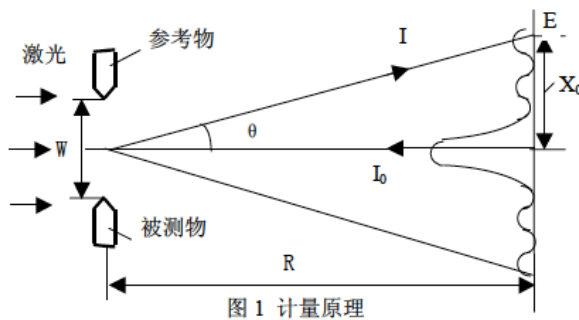


图 1 计量原理

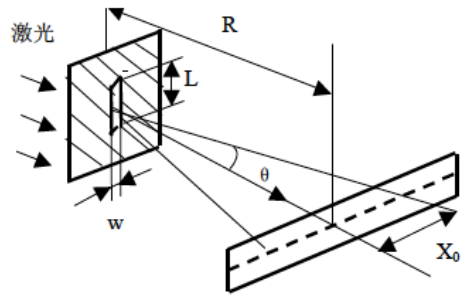


图 2 等效衍射

上式就是远场衍射光强分布的基本公式，说明衍射光强是随 $\sin \beta$ 的平方而衰减。当 $\beta = 0, \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots, \pm n\pi$ 处将出现强度为零的条纹，即 $I=0$ 的暗条纹。测定暗条纹的位置变化就可以知道间隙 w 的尺寸，这就是衍射计量的原理。

因为 $\beta = \left(\frac{\pi w}{\lambda} \right) \sin \theta$ ，则对暗条纹有

$$\left(\frac{\pi w}{\lambda} \right) \sin \theta = n\pi$$

当 θ 不大时，从远场条件有

$$\sin \theta \cong \operatorname{tg} \theta = \frac{x_n}{R}$$

式中： x_n 为第 n 级暗条纹中心距中央零级条纹中心的距离， R 为观察屏距单缝平面的距离。最后写成：

$$w = \frac{Rn\lambda}{x_n}$$

这就是衍射计量的基本公式。为计算方便，设 $\frac{x_0}{n} = t$ ， t 为衍射条纹的间隔，则

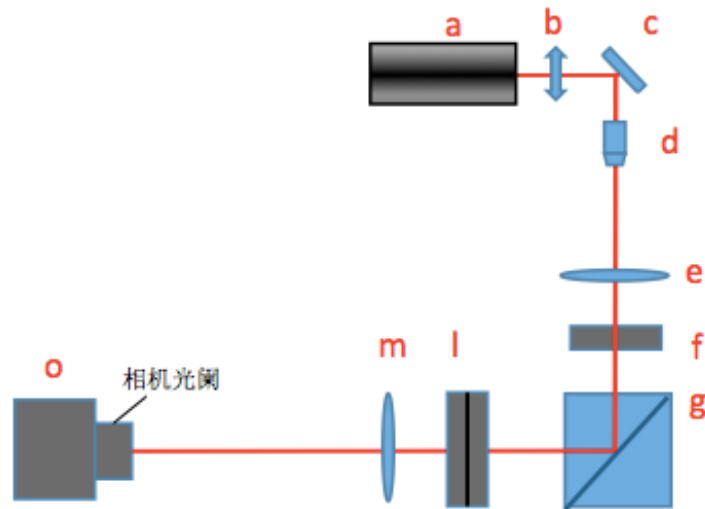
$$w = \frac{R\lambda}{t}$$

已知 λ ， R ($R=f$)，测定两个暗条纹的间隔 t ，就可以计算出 w 的精确尺寸。利用激光下形成的清晰衍射条纹就可以进行微米量级的非接触的尺寸测量。

三、实验器材

光电实验平台、电脑

四、实验光路图



a-激光器，b-衰减片，c-反射镜，d-显微物镜，e-准直透镜，f-可变光阑（调到最小产生细光束），g-分光棱镜，l-干板夹，m-成像透镜，o-数字相机

五、实验步骤

1. 开机，激光器 a 通电，待光强稳定；
2. 按实验光路图布置好光路，扩束激光；
3. 将分光棱镜 g 旋转 90° ，激光直接反射到干板夹方向。
4. 将干板夹中玻璃图案里的狭缝移至激光照射位置，激光透过狭缝衍射成像

5. 运行实验软件，选择实验五，用相机采集观察干涉条纹，调节数字相机使得衍射图像清晰
6. 保存图像，利用软件获取图像的一级，二级，三级衍射条纹间距
7. 根据记录数据，计算狭缝尺寸，填入下表

衍射级数 (n)	X_n	W	\bar{W}
1			
2			
3			

实验六 巴俾特原理及细丝直径测量实验

一、实验目的

1. 了解巴俾特 (Babinet) 原理
2. 利用互补测定法测量细丝直径

二、实验原理

激光衍射互补测定法的原理是基于巴俾特原理，图示如下。设一个任意形状的开孔，在平面波照射下，在接收屏上的复振幅用 U_1 表示；用同一平面波照射其互补屏时，在接收屏上其复振幅用 U_2 表示。当互补屏叠加时，开孔消失，在接收屏上的光强分布也应消失，合成复振幅应为零，即：

$$U = U_1 + U_2 = 0$$

即
$$\begin{cases} U_1 = -U_2 \\ |U_1|^2 = |U_2|^2 \end{cases}$$

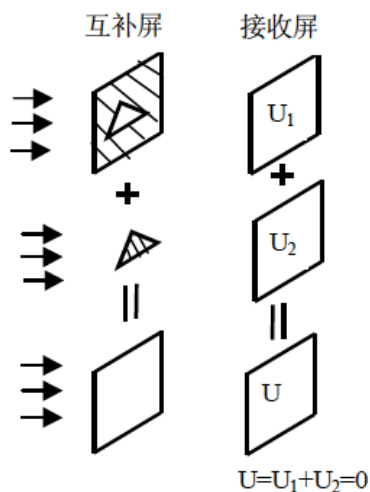
上式说明，两个互补屏所产生的衍射图形，其形状和光强完全相同，仅位相相差 $\frac{\pi}{2}$ 。这就是巴俾特原理。对激光衍射条纹来说，原来是亮条纹的位置上互补时将出现暗条纹。利用这个互补原理，就可以测定各种细丝和薄带的尺寸。

为获得明亮的远场条纹，一般用透镜在焦面上形成夫朗和费条纹，如图所示。设透镜的焦距为 f ，细丝直径为 d ，则计算公式为：

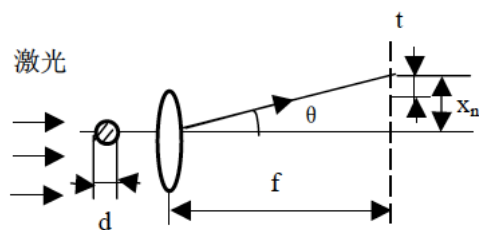
$$d \sin \theta = n\lambda$$

$$\sin \theta = \frac{x_n}{\sqrt{x_n^2 + f^2}}$$

故
$$d = \frac{n\lambda \cdot \sqrt{x_n^2 + f^2}}{x_n}$$



巴俾特原理

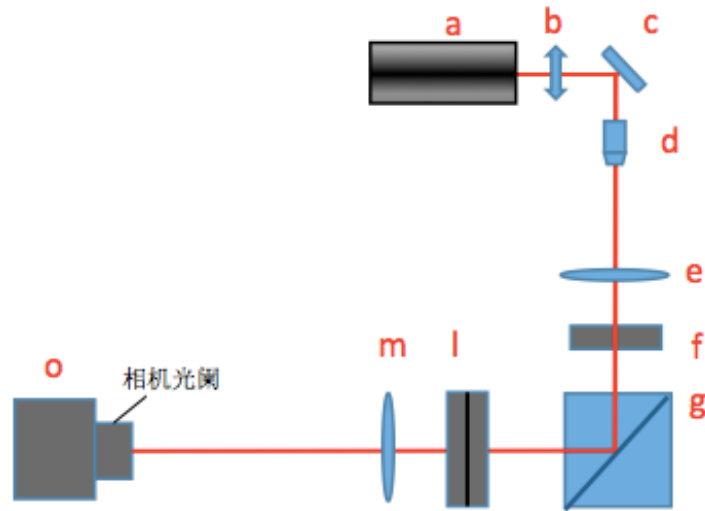


互补法测量的计算

三、实验器材

光电实验平台、电脑

四、实验光路图



a-激光器, b-衰减片, c-反射镜, d-显微物镜, e-准直透镜, f-可变光阑 (调到最小产生细光束), g-分光棱镜, l-干板夹, m-成像透镜, o-数字相机

五、实验步骤

1. 开机, 激光器 a 通电, 待光强稳定;
2. 按实验光路图布置好光路, 扩束激光;
3. 将分光棱镜 g 旋转 90° , 激光直接反射到干板夹方向。
4. 将干板夹中玻璃图案里的细丝移至激光照射位置, 激光透过细丝衍射成像
5. 运行实验软件, 选择实验六, 用相机采集观察干涉条纹, 调节数字相机使得衍射图像清晰
6. 保存图像, 利用软件获取图像的一级, 二级, 三级衍射条纹间距
7. 根据记录数据, 计算狭缝尺寸, 填入下表

	衍射级数 (n)	X_n	d	\bar{d}
细丝	1			
	2			
	3			

8. 将结果与激光衍射计量技术实验中狭缝产生的衍射实验做对比

实验七 激光共焦三维测量实验

一、实验目的

1. 认识共焦成像原理及其测量特点
2. 掌握共焦光学层析方法
3. 了解激光共焦测量的应用场合

二、实验原理

激光共焦测量是基于最新发展的共焦成像原理实现的。共焦成像其原理示于图 1。点光源 P 位于准直物镜 L1 的焦点上，发出的平行光经分光镜分光进入成像物镜 L2，在 L2 的焦点上成点光源 P 的像 P'。当被测件（试样）表面位于 L2 的焦面上时 ($d_1=F_2$)，入射光原路返回，过分光镜和另一准直物镜 L3 后，在 L3 的焦点上成点光源 P 的第二次成像 P''。只有当 P, P', P'' 在各自光学元件的焦点位置上，才成立共轭的成像关系，这就称为共焦成像。共焦成像在测量上具有如下特点：

(1) 当被测表面处于物镜的焦面位置时光线才能自准直反射，在探测器上成像并获得最大能量，因此具有很高的纵向分辨率，可用于精密测量的定位；

(2) 在探测器前加小孔，可以大大减小光学系统成像时的杂散光，使成像信号噪声最小；

(3) 当被测表面做三维移动（扫描）时存在层析性，即从表面很弱的离焦信息，可以精确测定表面的三维成像。从三维像重构物体，因而获得十分精确的表面形貌。

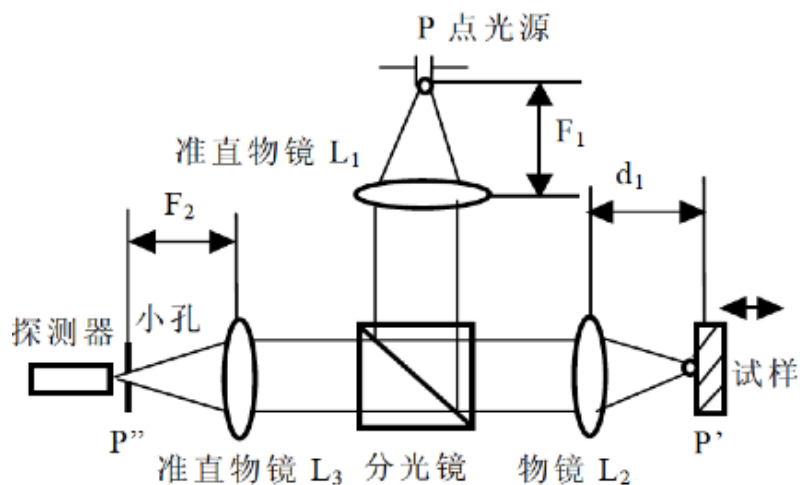


图 1 共焦成像原理图

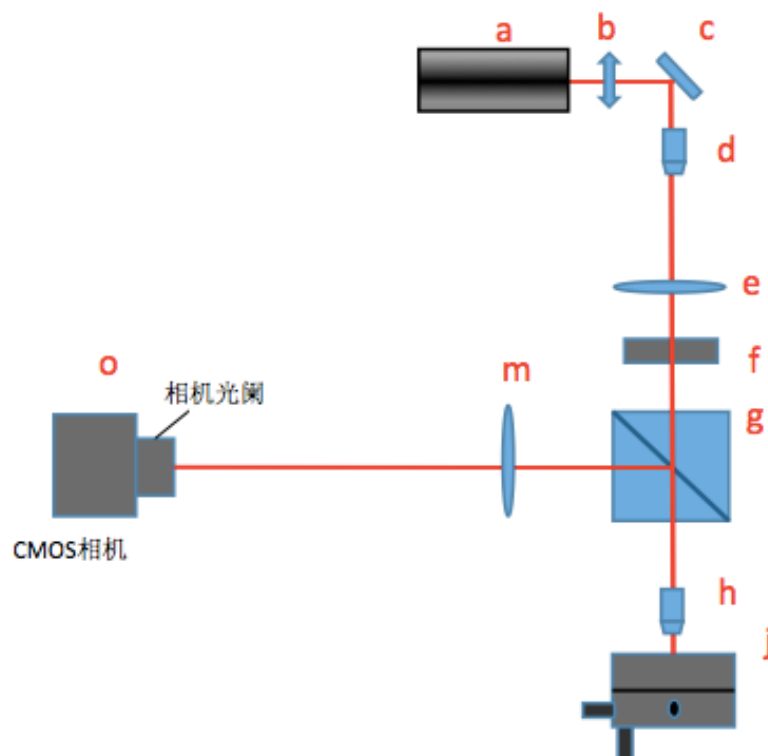
激光共焦成像与显微镜结合形成共焦显微术，已广泛用于生物，医学与工业

探测上，特别是活体的形貌探测上。激光共焦与荧光技术结合形成单光子及双光子共焦荧光显微术，这是当前分子光谱中最新的探测技术。

三、 实验器材

光电实验平台， 电脑

四、 实验光路图



a-激光器， b-衰减片， c-反射镜， d-显微物镜， e-准直透镜， f-可变光阑， g-分光棱镜， i-干板夹， h-共焦显微物镜， i-反射机构， m-成像透镜， o-数码相机

五、 实验步骤

1. 开机， 激光器 a 通电， 待光强稳定；
2. 按实验光路图布置好光路， 扩束激光；
3. 在反射机构 i 上安装反射镜；
4. 插入显微物镜 h， 运行实验软件， 选择实验七， 用相机采集观察激光光斑；
5. 调节光路， 使得激光光斑成像在相机中间位置。选择手动阈值或者自动阈值来设置光斑测量精度。使得反射镜 i 初始位置在共焦透镜的焦面上；
6. 推动反射镜下方的平移台， 使得相机采集到的光斑尺寸最小。
7. Z 向移动反射镜， 记录光斑尺寸的大小变化。

序号	光斑尺寸/mm	纵向位移值/mm
1		0.005
2		0.010
3		0.015
4		0.020
5		0.025
6		0.030
7		0.035
8		0.040

8. 绘制 Z 方向移动量与光斑尺寸的坐标图。

实验八 光学傅里叶变换及图像处理方法实验

一、 实验目的

1. 掌握傅里叶变换和夫琅禾费衍射之间的关系,
2. 观察各种典型几何图案傅里叶变换的衍射图,
3. 掌握夫琅禾费衍射的特点。

二、 实验原理

光学信息处理中最重要的一个理论是傅里叶变换效应, 傅里叶变换形式如下:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)e^{-j2\pi fx} dx \quad (1)$$

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{-j2\pi fx} df \quad (2)$$

这两个积分即傅里叶积分。 $G(f)$ 称为 $g(x)$ 的傅里叶变换, 或频谱。若 $g(x)$ 表示某空间域的物理量, $G(f)$ 则是该物理量在频率域的代表形式。 $G(f)$ 作用即作为各种频率成分的权重因子, 描述各复指数分量的相对幅值和相移。当 $G(f)$ 是复函数, 可以表示为

$$G(f) = A(f)e^{j\Phi(f)} \quad (3)$$

式中, $A(f) = |G(f)|$, 是 $g(x)$ 的振幅频谱; $\Phi(f)$ 是 $g(x)$ 的相位频谱, 非周期函数的频谱不是离散的, 而是频率 f 的连续或分段连续的函数。所有适当加权的各种频率的复指数分量叠加起来就得到原函数 $g(x)$, 称它为 $G(f)$ 的傅里叶逆变换。

$g(x)$ 和 $G(f)$ 构成傅里叶变换对。

二维傅里叶变换只是一维傅里叶变换的推广

$$G(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y)\exp[-j2\pi(ux + vy)]dxdy \quad (4)$$

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(u, v)\exp[j2\pi(ux + vy)]dudv \quad (5)$$

式中, $\sqrt{u^2 + v^2}$ 为空间频率, 对图像信号而言, 空间频率是指单位长度内亮度做周期性变化的次数。

在这里, 以矩孔为例, 来说明夫琅禾费衍射即傅里叶变换的特点。矩孔的复振幅透射系数为:

$$t(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right)\text{rect}\left(\frac{y_1}{b}\right) = \begin{cases} 1 & |x_1| \leq a/2, |y_1| \leq b/2 \\ 0 & |x_1| > a/2, |y_1| > b/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中， a 、 b 分别为矩孔的长和宽。根据傅里叶变换公式(4)(5)，则：

$$E(x, y) = C'F[t(x_1, y_1)] = C'T(u, v) = C'absinc(au)sinc(bv) \quad (7)$$

式中， F 代表傅里叶变换， $u = x/\lambda f, v = y/\lambda f$ ，相应的光强分布为：

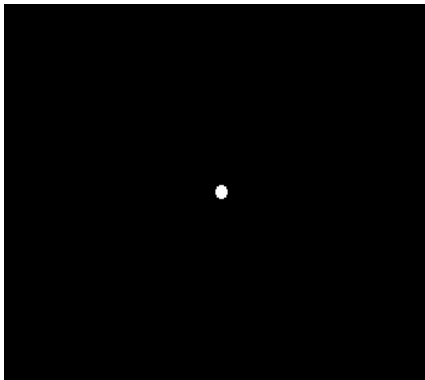
$$I(x, y) = |E(x, y)|^2 = I_0 \left[\frac{\sin \pi \left(\frac{ax}{\lambda f} \right)}{\pi \left(\frac{ax}{\lambda f} \right)} \right]^2 \left[\frac{\sin \pi \left(\frac{by}{\lambda f} \right)}{\pi \left(\frac{by}{\lambda f} \right)} \right]^2 \quad (8)$$

式中， $I_0 = |E|^2$ ，上式进一步简化为：

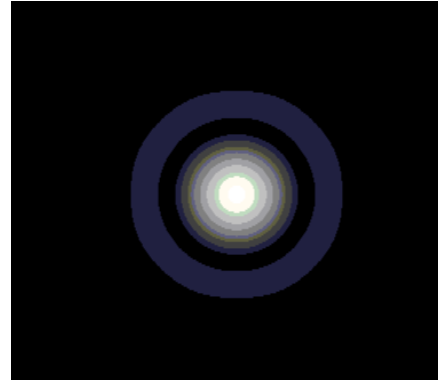
$$I(x, y) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (9)$$

式中， $\alpha = \pi \left(\frac{ax}{\lambda f} \right); \beta = \pi \left(\frac{by}{\lambda f} \right)$ 。

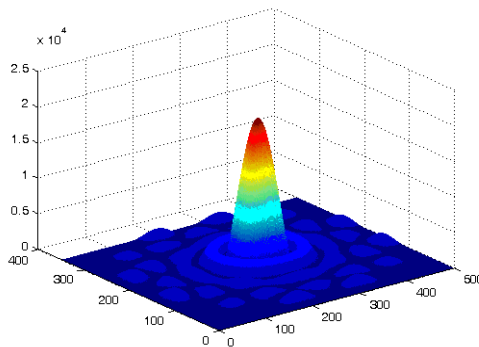
下面为几个典型的傅里叶变换对图像：



(a)



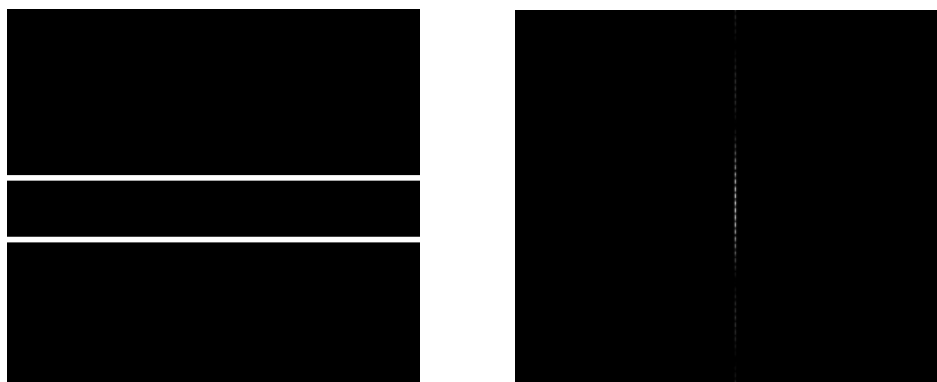
(b)



(c)

图1 圆孔仿真效果 (a) 原始图片 (b) 傅里叶变换后的频谱图 (c) 三维功率分

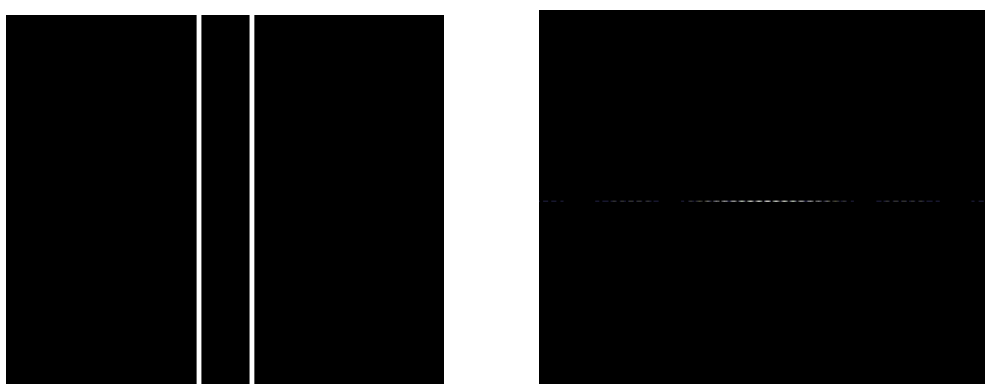
布图



(a)

(b)

图 2 纵向双缝仿真效果 (a) 原始图片 (b) 傅里叶变换后的频谱图



(a)

(b)

图 3 横向双缝仿真效果 (a) 原始图片 (b) 傅里叶变换后的频谱图



(a)

(b)

图 4 方孔仿真效果 (a) 原始图片 (b) 傅里叶变换后的频谱图

通过实验我们可以得到以下结论：

夫琅禾费衍射即傅里叶变换最主要的特点是：衍射现象扩散程度与孔径大小成反比。

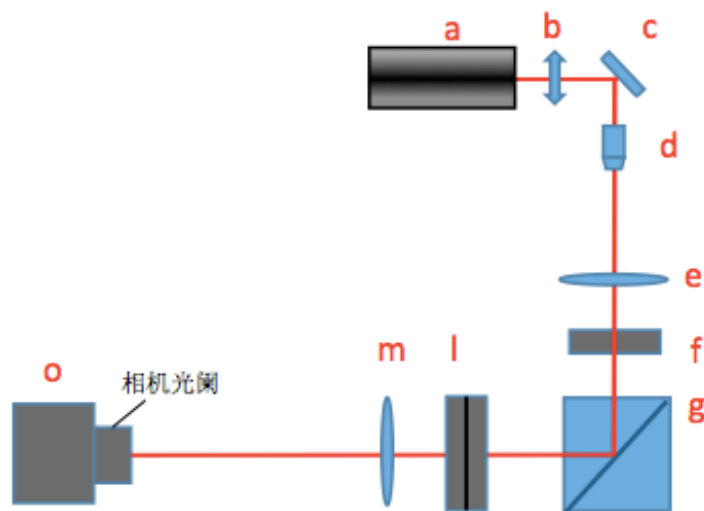
傅里叶变换的缩放定理表明，空域中坐标 x 的收缩（或扩展），导致空间频域中坐标 u 按同一比率扩展（或收缩），同时频谱的振幅相应降低（或增加）。这说明物函数的尺度缩小，是频谱函数的尺度放大，但频谱的函数形式不变。在衍射这一物理问题中，表明对光的限制越严重，衍射现象越明显，呈现出反比的关

系。

三、 实验器材

光电实验平台， 电脑

四、 实验光路图



a-激光器， b-衰减片， c-反射镜， d-显微物镜， e-准直透镜， f-可变光阑， g-分光棱镜， l-干板夹， m-成像透镜， o-数字相机

五、 实验步骤

1. 开机， 激光器 a 通电， 待光强稳定；
2. 按实验光路图布置好光路， 扩束激光；
3. 将分光棱镜 g 旋转 90° ， 激光直接反射到干板夹方向。
4. 将干板夹中玻璃图案里的圆孔图案移动到激光光路中心， 产生衍射图。
5. 运行实验软件， 选择实验七， 打开相机， 调节数字相机使得衍射图像清晰， 观察并保存衍射图案
6. 依次将圆孔、方孔、单缝、双缝等图案移至激光光路中心， 观察并保存记录衍射成像图案。
7. 数据处理部分， 可自行设计原始图像， 并仿真计算衍射变化后的成像结果， 可与实际的衍射成像进行对比。