

实验十 傅里叶光学基础

【实验简介】

傅里叶光学，又称傅里叶变换光学是现代光学的一个重要分支和组成部分；它在波动光学的干涉和衍射理论的基础上，进一步总结和抽象化出了频域空间、实空间及其关联关系的概念和规律总结；它为现代光学信息处理奠定了理论基础。阿贝成像原理的实验是一个利用相干光源进行两步成像（衍射和干涉，分别成像在频谱面和像面）的实验，其过程和操作很好地体现了傅里叶光学中空间滤波与信息处理的概念和过程；它是傅里叶光学最基础但是又是最直观的实验展现。

本实验希望通过学生自己动手，利用提供的光学部件，组装光路，完成阿贝成像等若干傅里叶变换光学的实验；使得学生锻炼基本光学实验技能（包括准直，成像等），体会傅里叶光学中关于频谱面、空间滤波等的概念。

本实验由三个子实验组成，它们分别是阿贝成像与基本空间滤波、光学 4F 系统成像和假彩色编码实验。阿贝成像与基本空间滤波，使用一个相干光源照明一个既有低频轮廓信息又有高频载波信息的光栅字，通过选择性控制其在频谱面上衍射花样的通过，实现特定的（高通、低通等）空间滤波功能。光学 4F 系统成像实验，做为补充实验，为提高成像的亮度，在阿贝成像基础上，搭建光学 4F 系统，体验图像还原的过程。假彩色编码实验，使用宽带的白光光源照明一个预先分区空间编码的图像，然后在频谱面根据对应区间部分进行选色滤波，从而实现对不同空间编码的部分进行人为着色的效果。

在实验过程中，建议关闭或者调低室内照明光亮度，可以提高实验中所成像的衬度和效果。在实验过程中，建议要求学生拍照记录实验中使用的各个滤波器及其最终成像效果（和其他必要的记录），以便更好的完成实验过程的记录和滤波操作与效果的关联。

【注意事项】

- 1、**建议使用相机拍摄滤波后或者图像处理后的像的效果**；一方面图像可能比肉眼观察效果好，另一方面，也便于集成或者打印后集成进实验报告。
- 2、使用针或者刀片自制空间滤波片时，请一定注意安全，不要伤害到自己。
- 3、切割或者穿刺制备滤片时，**请使用垫板**，防止伤到自己或者桌子。

第一部分：阿贝成像与基本空间滤波

【实验目的】

- 1、掌握一维导轨上光路的调节。
- 2、通过搭建阿贝成像光路和观察不同空间滤波器的效果，体会和理解成像过程、频谱面、谱空间与实空间对应关系、空间滤波、衍射等物理概念。

【实验原理】

阿贝成像是傅里叶光学的最基本和最直观的一个展示实验；其很好地体现了波前传递时，透镜操作下频谱面的存在与频谱面的特殊意义。阿贝成像原理所提出的时间和其物理概念都是介于传统几何光学与现代光学 - 基于波前传递的光场传播 - 之间，并为现代光学的概念和理解奠定了基础。

这里我们简要介绍和对比传统光学、阿贝成像原理与现代光学对于成像过程的不同理解和物理图像。如图 1 所示，基于几何光学的传统光学把‘物’理解为光源，‘物’与‘像’理解为一对一的映射关系，而透镜是实现把发散的光线重聚焦和实现‘物’与‘像’映射关系的核心部件。阿贝成像原理体现了以光场为核心，变‘物’、‘像’和透镜为操作的现代光学的概念，把成像从传统光学的一步走，变成了两步走；在第一步中，入射光场被物平面衍射形成一个携带物信息的衍射场，该衍射场经过透镜的变换操作在频谱面形成频谱斑，而这些衍射斑就是‘物’信息与光场卷积后的变换花样；接下来的第二步，这些携带了‘物’信息的频谱斑成为新的相干光源发射球面波，并通过光场的进一步传播在像平面实现退卷积，从而干涉成像。在基于波前的现代光学图像中，光场本身所遵循的传播规律，即麦克斯韦方程组演化出来的波前传播规律，是其最核心的概念和出发点。在这种图像下，无论光场的自由传播，还是‘物’的引入和透镜操作都被一视同仁地看作是一种对于波前的操作。光场的自由传播是波前随时间和空间变化的自操作或者演变，‘物’的引入是物信息对于光场载波的空间或者频率上的调制，透镜是对于波前相位的一种特殊化 - 可以实现面聚焦效果 - 的操作；而频谱面和像面上的图像都是‘物’的信息经过透镜操作和光场传播后在特定位置形成的特定波前而已。

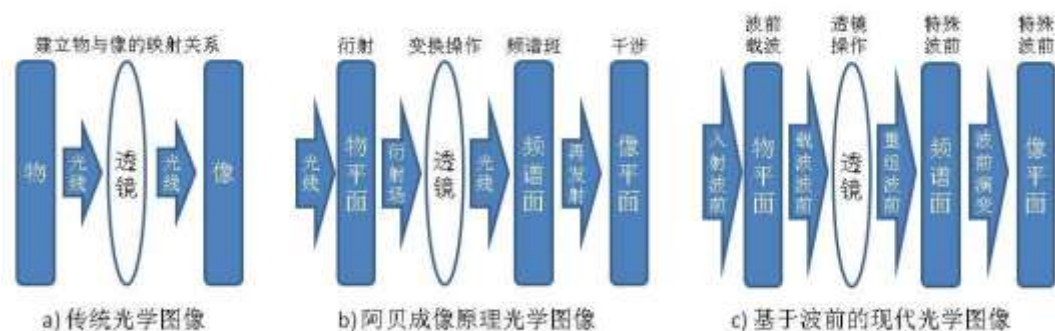


图 1 对于透镜成像的不同理解与图像

阿贝成像原理的主要价值是很好地理解和体现了透镜成像的傅里叶变换效果，并把握了频谱面的存在和其重要价值。前面谈到的三种图像和概念都有其存在的价值和合适的应用场合，并没有绝对的对错。一般性的来讲，任何一个物理定律或者物理图像都是对于现实世界规律的简化和抽象化理解；现实世界过于复杂，需要简化了的和抽象化的图像来理解和预见现实世界，但是没有任何图像可以被穷举所有情况来验证其绝对正确性。一个好的物理图像为我们提供了，在某种一般性地特定前提条件下（虽然我们有时暂时不知道这个前提是什么），对于现实的正确描述和预见。一个适用范围更广的、更普遍的（即传统意义上的“更对的”）物理图像，往往付出的是更为复杂的结构和级数增长的计算量来做预见；在可简化的场景下，使用合理简化图像是更正确的选择。而阿贝成像原理在原有波动光学衍射和干涉概念的基础上，通过数学上引入傅里叶变换方程，通过物理上引入频谱面、频谱花样与物信息的关联关系等概念，为空间滤波和操作提供了有力理解工具，并为傅里叶变换光学奠定了基础。

阿贝成像原理的证明和思路，（具体数学细节请参考相关光学书籍）基本可以表述为以下要点和步骤（参见图 2）：

0. 物、透镜、频谱面和像面都在 x, y 面内，光场延 z 方向传播；透镜焦距为 F ，单色相干光源波长为 λ 。
1. 任何一个物对于一个单色平行入射的相干光源的调整，可以理解或者转化为一系列延空间方向变化的余弦光栅的总和；暂时只考虑仅延 x 方向的变化，因为 x, y 方向是正交和独立的，所以 y 方向可以类比 x 方向的讨论和结果；这些不同频率的余弦光栅的空间频率为 f_i ，其物光波波前为

$$U_{ob}(x, y) = A_1(t_0 + t_i \cos 2\pi f_i x)$$

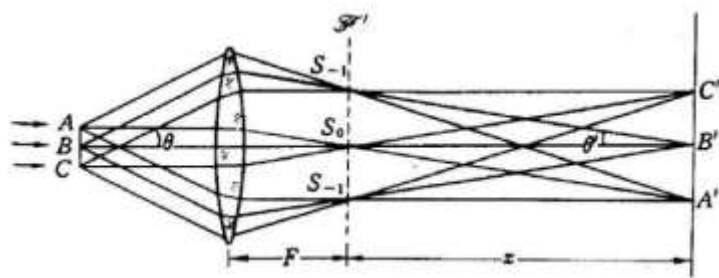


图 2 阿贝成像原理说明图（取自参考文献[4]）

2. 仅考虑其中一个单频信息 f_i ，其经过物镜变换后，该光场会在后焦面 - 即频谱面 - 形成 3 个点状衍射斑 S_0 , S_{+1} 和 S_{-1} ；这三个点状衍射斑中， S_0 处于 xy 平面的中心，即 $S_0=0$ ；而 S_{+1} 和 S_{-1} 分别对称地分布在 x 方向的偏轴位置上，其偏轴距离满足

$$S_{\pm 1} = \pm F \tan \theta_i, \text{ 其中 } \sin \theta_i = f_i \lambda$$

这三个相干点光源成为新的次级光源，然后发射球面波；这三个点源的光场复振幅分别为

$$A_0 \propto A_1 t_0 e^{ikL(BS_0)}, A_{+1} \propto \frac{1}{2} A_1 t_i e^{ikL(BS_{+1})}, A_{-1} \propto \frac{1}{2} A_1 t_i e^{ikL(BS_{-1})}$$

3. 这三个新光源的相干光在像面形成干涉，其干涉像场最终结果为

$$U_{im}(x', y') = K e^{ik \frac{x'^2 + y'^2}{2z}} A_1 (t_0 + t_i \cos 2\pi f'_i x')$$

根据以上讨论，我们可以得到：1) 物原本的单频信息 f_i 可以在像面重构为相似的但是空间频率为 f'_i 的信号，其比值 $V \equiv \frac{f'_i}{f_i}$ 就是放大率；2) 考虑到一个一般性的物是一系列 f_i 的组合，因此在像面也会成一个同样的由 f'_i 组合的像，其放大率为 V ；3) 频谱面上的 S_0 对应的就是物信息中的 0 频信息 $A_1 t_0$ ，其位置处于面内的源点；正负两方向的衍射点 S_{+1} 和 S_{-1} ，代表了指定频率 f'_i 的信息 $A_1 t_i$ ，其位置由焦距 F 和衍射角 θ_i 决定，空间频率 f_i 越大，衍射角 θ_i 就越高，衍射点 S_{+1} 和 S_{-1} 离中心就越远。

在下面的实验中，我们会实现和体会上面谈到的物的照明（光源的准直）、透镜成像、频谱面的存在、频谱斑的操作及其效果。

【实验仪器与用具】

组件名称	包含器件
激光器组件	激光器、棱镜夹持器、一维平移台、宽滑块、支杆和套筒
扩束镜组件	凹透镜（ $\Phi 6$, $f=10\text{mm}$ ）、透镜架、滑块、支杆和套筒

准直镜组件	凸透镜（ $\Phi 40$, $f=80\text{mm}$ ）、透镜架、滑块、支杆和套筒
光栅字组件	光栅字（ $\Phi 40$, 10 线/mm）、滑块、支杆和套筒
变换透镜组件	凸透镜（ $\Phi 76$, $f=175\text{mm}$ ）、镜架、滑块、支杆和套筒
滤波器组件	滤波器（低通、方向滤波）、干板架、滑块、支杆和套筒
白屏组件	白屏、干板架、滑块、支杆和套筒

【实验内容】

1. 光路布置和调节：

（1）参照图 3 布置光路，自左向右依次为激光器组件、扩束镜组件、准直镜组件、光栅字组件、变换透镜组件、滤波器组件和白屏组件。（附：相邻组件纵向间隔距离参考数值，即图 3 中红线与红线之间距离依次 40mm、70mm、40mm、240mm、195mm 和 445mm）。

（2）等高平行：安装激光器和白屏，调整激光器出光口到支杆顶部距离为 90mm（仅供参考），调试平移台及激光器俯仰使其沿导轨中心水平传播。调试之前可选择固定参考高度（比如在白屏中心上做刻度），反复调节白屏前后位置，直到激光在近处和远处均能打在白屏上同样参考高度位置，则视为激光器水平调整完成。

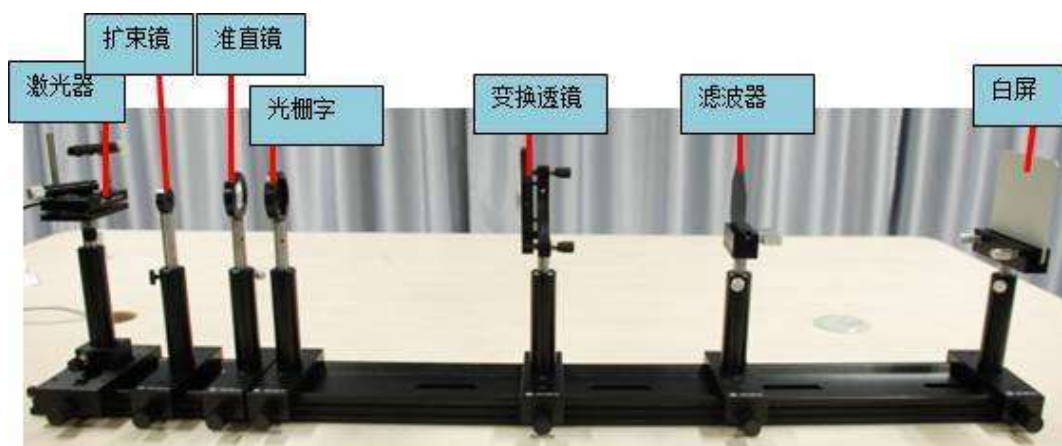


图 3 阿贝成像原理及空间滤波原理实物图

（3）安装扩束镜，上下调整支杆使扩束光斑中心与参考中心重合，然后固定。

（4）安装准直镜，准直镜距扩束镜大概 70mm（共焦调整）即可获得平行光，上下调整支杆使平行光束与参考中心重合，然后固定。

（5）安装光栅字，上下调整支杆使光斑正入射“光”字，然后固定。光栅字位置尽可能靠近准直镜。

（6）安装变换透镜，上下调整支杆使入射“光”字从变换透镜中心通过，此时在白屏上可看到模糊像，前后移动变换透镜直至在白屏上看到清晰的放大倒立实像，然后固定。

(7) 安装滤波器，沿导轨前后移动滤波器，同时观察滤波器上的花样；当花样最清晰时，即为变换透镜的频谱面位置，应在此处固定滤波器支架。

(8) 测试不同滤波器：在后面的实验中，在滤波器支架上使用不同的滤波器，观察屏上的滤波后的效果。注意在此过程中，不要移动所有的光学器件的位置，包括滤波器支架的水平位置。

2. 观察“光”栅字的像和频谱：

首先，去掉滤波器，观察没有滤波状态下的物像，当放大倍数足够大时(像距足够远时)，我们应该可以观察到“光”字的像中间既有横向条纹，也有竖向条纹。

实验中使用的“光”字是用空间频率为 12 线/mm 的正交光栅调制的，在变换透镜的频谱面上放置一个屏，即可观察到如图 4 所示的频谱点，可根据目标物分析频谱。

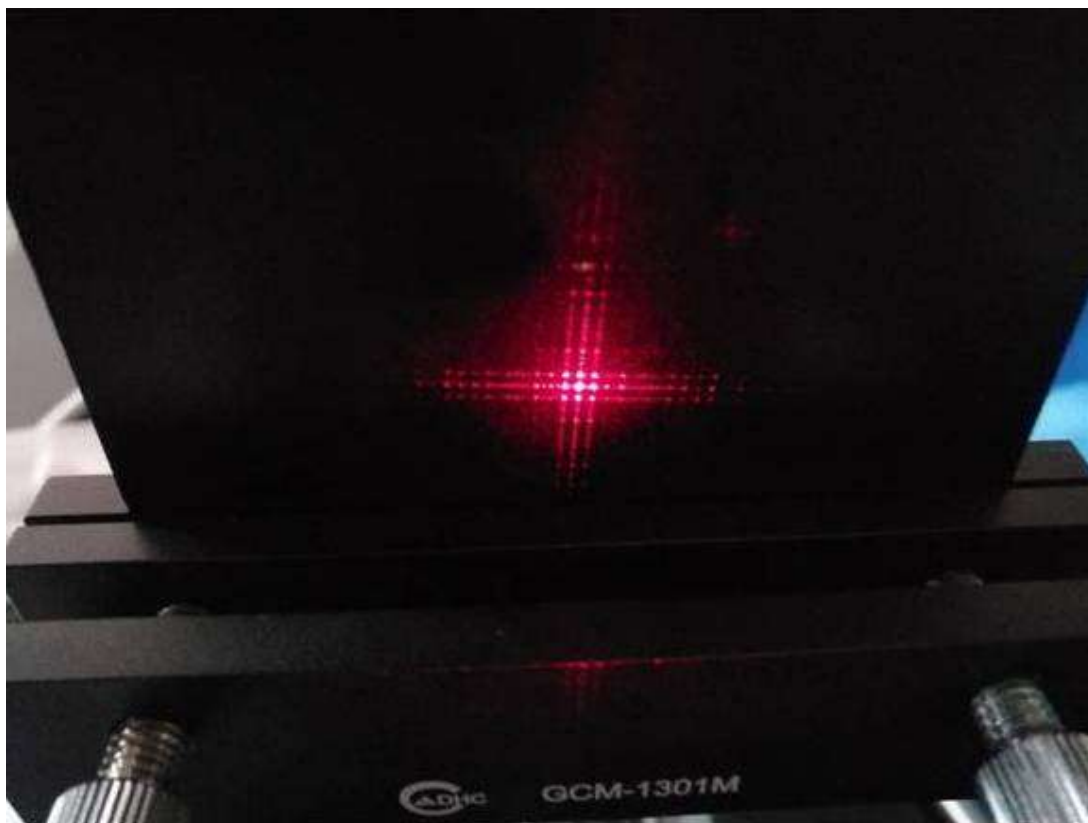


图 4：‘光’栅字的频谱点

3. 观察方向滤波和低通滤波的实际效果：

(1) 选择滤波器中的“缝”，在频谱面水平放置，使包括 0 级在内的一排点通过，我们可以观察到“光”的像中间充满竖向条纹。

(2) 将“缝”旋转 90 度竖直放置, 使包括 0 级在内的一排点通过, 我们可以观察到“光”的像中间充满横向条纹。

(3) 将滤波器中的“孔”放置在频谱面, 只让 0 级点通过, 我们即可以观察到 “光”的像中间没有条纹, 只剩下“光”字轮廓。

4. 自行设计和测试空间滤波器 (选做实验):

利用提供的硬纸卡片设计和制作特定功能的空间滤波器, 并说明和记录该空间滤波器的功能和效果。注意事项:

(1) 可使用直尺, 圆规, 铅笔等实现滤波器设计; 可使用针, 刀片, 打孔器等实现卡片制备;

(2) 如果图样太复杂, 存在支撑问题, 可考虑使用多个卡片重叠实现或者使用透明卡片粘贴遮光片的方法实现;

(3) 需要记录 (例如拍照) 所设计滤片, 简要说明原理和功能, 并拍照记录实际滤波效果。

(4) 最好能够在实验预习时就考虑好自选滤波片的设计、参数和功能, 这样可以留更宽裕的时间实现实验。(光栅参数和各种光学参数都已在讲义中说明。)

(5) 选做实验例子: a) 当“缝”与光栅方向夹角 45 度放置滤波时, 会有何效果? b) 前面实验中, 我们使用低通滤波 (仅让 0 级斑通过) 实现了光栅格子信息的消除; 如何做个高通滤波的例子? 应该如何实现和它的效果是什么?

第二部分：光学 4F 系统成像

【实验目的】

体会和掌握光学 4F 成像系统的组织和搭建；在前面阿贝成像实验的基础上，进一步体会更为复杂的光学信息处理。光学 4F 系统目前广泛应用于飞秒激光脉冲整形器中，产生不同频带和脉宽的光脉冲。

【实验原理】

光学 4F 图像处理系统：

前面阿贝实验是使用的单透镜成像系统。单透镜成像系统用于图像处理的优点是其简单的光学系统；但是其有以下缺点：a) 成像需求与频谱面处理需求可能存在冲突，可控和可调节参数太少。例如在实验 2（假彩色编码实验）中，如果因为光源不够亮，我们想成一个较小的像从而提高像的亮度，这就需要把物与成像透镜（也是变换透镜）的距离加大；当物与成像透镜的距离较大时，会出现物的衍射光显著超出成像透镜尺寸边缘的情况，从而造成待处理空间信息缺失的情况。b) 单透镜成像时，像场函数与原物场函数还相差一个相位因子函数（参考阿贝成像原理部分的讨论）：

$$U_{ob}(x, y) \rightarrow U_{im}(x', y') = K e^{ik \frac{x'^2 + y'^2}{2z}} U_{ob}\left(\frac{x'}{V}, \frac{y'}{V}\right)$$

在相干光学中，图像的相位是非常重要的，很多时候有必要保持处理后的图像场仍然保持原物场的相位函数。

4F 图像处理系统（如下图 5 所示）使用两个透镜依次实现傅里叶变换和反傅里叶变换的光学操作，把成像要素与频谱操作要素分离开，是一种可控性、保真性、稳定性更好的相干光学处理系统。a) 在前段中讨论的实验中需要成较小像的情况中，可以通过改变透镜 2（反傅里叶变换透镜）的焦距来改变放大率，但是不会影响傅里叶变换部分的光路。b) 同时，在 4F 图像处理系统下，物场函数处于透镜 1（傅里叶变换透镜）的焦距处，因此其像面位置（在不考虑透镜 2 的情况下）在透镜 1 后无限远处，即上面公式中的 $z=\infty$ ，此时上面公式中多出的相位函数 $e^{ik \frac{x'^2 + y'^2}{2z}}$ 蜕变成 1；透镜 2（反傅里叶变换透镜）只是把无限远处的无限大的像重新整合到了后焦面处。在无滤波和放大倍率为 1 时，4F 图像处理系统所成的像场函数是严格（包括相位）复制了物场函数的。

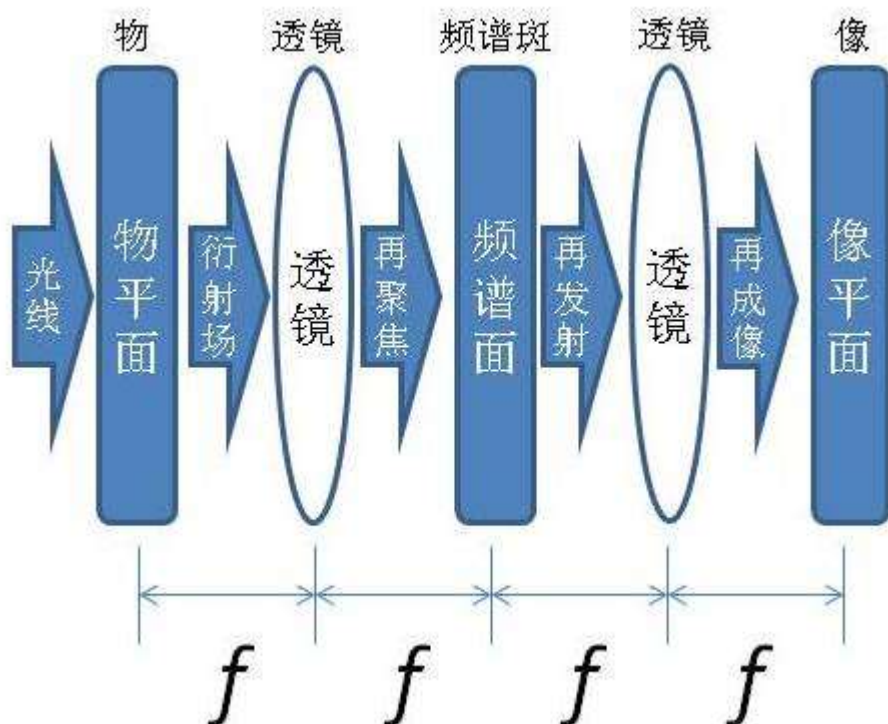


图 5 相干光学处理系统（4F 系统）

光学 $4f$ 系统成像，如图 5 所示。一束平行光照射透明物体（待处理的图像），物置于第一个透镜的前焦面处，在第一透镜的后焦面上得到物函数 $g(x_0, y_0)$ 的频谱 $G(f_\xi, f_\eta)$ ，此频谱面又位于第二透镜的前焦面上，在第二透镜的后焦面上得到频谱函数的傅里叶变换 $g(x, y)$ 。物函数经过两次傅里叶变换又得到了原函数，只是变成了倒像。在上图中，像平面采用的 x, y 坐标与物平面的 x_0, y_0 坐标的方向相反，因而可以消除由于两次傅里叶变换引入的负号。如果在频谱面上插入空间滤波器就可以改变频谱函数，从而使输入信号得到处理。

【实验仪器与用具】

组件名称	包含器件
光源组件	半导体激光器（650nm）一维平移台、宽滑块、支杆和套筒
准直镜组件	凹透镜（ $\Phi 6$, $f=9.8\text{mm}$ ）、凸透镜（ $\Phi 25$, $f=80\text{mm}$ ）、透镜架、滑块、支杆和套筒
调制物组件	物板、干板架、滑块、支杆和套筒
变换透镜组件	凸透镜（ $\Phi 40$, $f=150\text{mm}$ ）2 个、镜架、滑块、支杆和套筒
滤波器组件	滤波器（低通、方向滤波）、精密平移台、干板夹、滑块、支杆和套筒
白屏组件	白屏、干板架、滑块、支杆和套筒

【实验内容】

光路可按如下步骤调节（如图 6 所示）：

- （1）在实验一阿贝成像基础上，激光器、扩束镜、准直镜和白屏不用移动。
- （2）安装物孔：把实验提供的物孔（此处光栅字或带字白纸）垂直方向安装到一个支架上；上下调整支杆使准直后的光斑中心正入射物孔（应使物孔尽可能处于光斑的中心），然后固定物孔支杆。物孔位置应当尽可能靠近准直镜，以减少不必要的光程；固定物孔支架滑块，以防移动。
- （3）安装变换透镜 1：在物孔后方放置变换透镜 1 ($f=150\text{mm}$)，上下调整支杆使入射物孔后的光，从变换透镜中心通过，在此中心位置固定支杆（即固定垂直高度）；然后，移动变换透镜 1 使其尽可能接近物孔（尽可能减少不必要的光程），并在此处固定变换透镜 1 支撑滑块（即固定水平位置）。
- （4）安装变换透镜 2：在变换透镜 1 后方放置变换透镜 2 ($f=150\text{mm}$)，上下调整支杆使入射变换透镜 1 后的光，从变换透镜 2 中心通过，在此中心位置固定支杆（即固定垂直高度）；然后，移动变换透镜 2 到距离变换透镜 1 两倍焦距的地方，并在此处固定变换透镜 2 支撑滑块（即固定水平位置）。注意：变换透镜是有可能在两个方向上的焦距稍有差异的，因此两个变换透镜需要对称（或者对易）使用，即两个变换透镜必须使用相同的焦距方向相对放置。为了减少像差，透镜放置原则可以简单记为“凹凸面对准平行光”。
- （6）在白屏上观察成像的特点，可以看到与物体等大的清晰的物像，观察与阿贝成像时单透镜成像的区别。可以在频谱面上安装滤波器，观察像的变化。

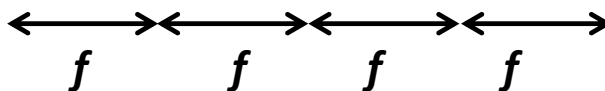
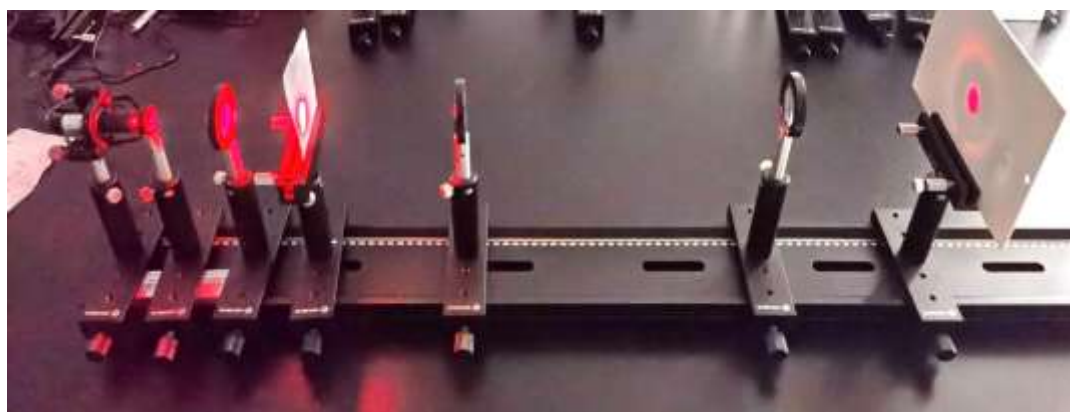


图 6 光学 4F 系统成像实际光路图

第三部分：假彩色编码

【实验目的】

在基本空间滤波的基础上，进一步体会光栅衍射的色散效果和选频滤波操作，掌握 θ 调制假彩色编码的选频滤波和色散选区滤波的原理；并利用提前预制分区信息的光栅图案，实现该图像的假彩色编码。

【实验原理】

在前面的阿贝成像实验中，我们讲解了频谱面、频谱面上的基本滤波操作（方向滤波和低通滤波）；在本章节，我们会使用白光光源来照明一个分区事先预制了不同取向光栅的天安门图案；然后分别使用颜色滤波器和自制的空间选色滤波器，来实现天安门图像的选区假彩色编码。

物的样品如图 7a 所示。其中天空、天安门、草地三个区域是通过三次分别曝光预制了不同方向的光栅刻线，其空间频率为 100 线/mm。空间滤波示意图如图 8 所示。一个白光光源照射透明的天安门(物面上的被调制物)，然后携带了物信息的衍射场会继续向前传播，这时由于入射光为白光且光栅的衍射行为，不同颜色的光会分散开了，开始呈现多彩颜色；衍射场经透镜重新汇聚，在频谱面会形成较清晰的彩色频谱花样；由于天安门花样上不同的区域（天空、天安门、草地）的光栅方向是不同的，所以其衍射花样也会延三个不同方向展开，呈现出彩色的带状花样；大致方位和取向如图 7b 所示，一个实拍的照片如图 7c 所示。这时，可以选择使用 1) 三个不同方向不同颜色（红、绿、蓝）的彩色滤片来过滤不同方向的衍射斑条纹；2) 或者也可以使用一张白纸，在其上根据不同部位的衍射斑来选取指定的颜色通过；以上两种方法都可以实现不同区域的彩色编码。由于这种编码方法是利用不同方位的光栅对图像不同空间部位进行调制来实现的，故称为 θ 调制空间假彩色编码。而该实验的目标配色结果为图 c 所示的绿草地、红天安门和蓝天。



图 7 a) 被调制物示意图, b) 分区对应衍射方向, c) 目标分区着色

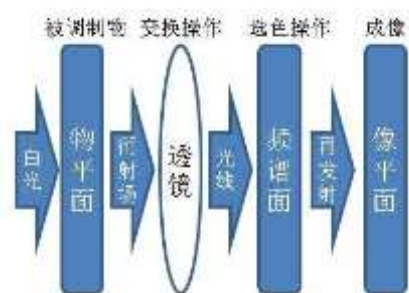


图 8 空间滤波原理图



图 9 θ 调制频谱花样与选色滤波示意

【实验仪器与用具】

组件名称	包含器件
光源组件	白光 LED、一维平移台、宽滑块、支杆和套筒
准直镜组件	凸透镜（ $\Phi 40$, $f=80\text{mm}$ ）、透镜架、滑块、支杆和套筒
调制物组件	天安门光栅（100 线/mm）、干板架、滑块、支杆和套筒
变换透镜组件	凸透镜（ $\Phi 76$, $f=175\text{mm}$ ）、镜架、滑块、支杆和套筒
滤波器组件	滤波器、干板架、滑块、支杆和套筒
白屏组件	白屏、干板架、滑块、支杆和套筒

【实验内容】

1. 光路布置和调节：

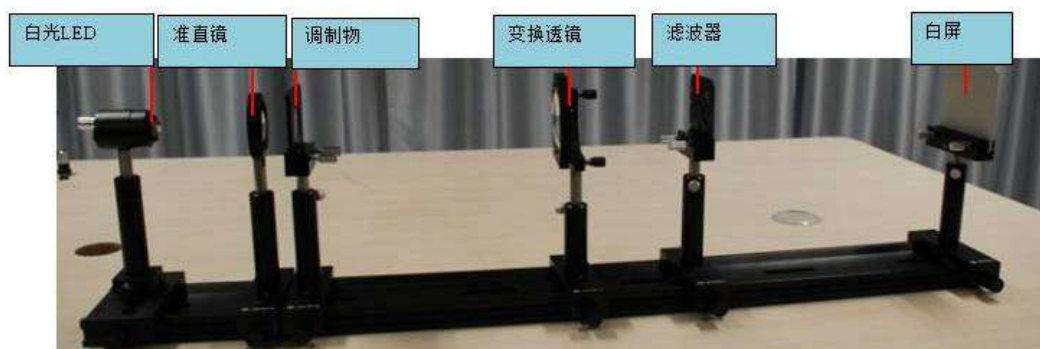


图 10 假彩色编码实际光路

（1）参照图布置光路，自左向右依次为光源组件、准直镜组件、调制物组件、变换透镜组件、滤波器组件和白屏组件。（附：相邻组件水平方向间隔距离参考数值，即图中红线

与红线之间距离依次 80mm、40mm、275mm、160mm 和 335mm。)


(2) 安装白光光源：安装调整白光 LED 光源；调节 LED 光源支杆高度并固定于支杆靠近中间的位置，使得 LED 光源到支杆顶端的距离约为 90mm（仅供参考）。

(3) 安装白屏：将白屏固定在导轨右侧，尽量远一些。

(4) 安装准直镜：在距离 LED 发光点大约 80mm 附近放置准直透镜；然后，首先调节准直透镜的高度，使得 LED 光源发光点与准直透镜的中心水平对齐，并在白屏中心，固定准直透镜的垂直高度；下一步，水平调节准直透镜的位置，直到通过其后的白光成为在近处和远处的光斑大小大致一样的准直光。（注意，由于此处为白光光源，单透镜有色差，所以不可能作到绝对的准直；只要在远处的情况下，最中心的白色亮斑与近处时的白色亮斑大小一致即可。）在此准直条件下，固定准直镜支撑滑块（即固定水平位置）。


(5) 安装天安门光栅：上下调整支杆使光斑正入射天安门中心，然后将其固定。

(6) 安装变换透镜：上下调整支杆使入射光尽可能从变换透镜中心通过，此时在白屏上可看到模糊像，前后移动变换透镜直至在白屏上看到放大倒立实像，然后固定。

(7) 安装滤波器：安装滤波器支架，并安装一个纸片或者铁片于支架上；然后，沿导轨水平移动滤波器支架，并观察衍射光斑的变化；直到纸片或者铁片上呈现清晰的频谱面花样时（请参考  图），即为变换透镜的频谱面位置；在此处，固定滤波器支架的水平位置。后面，使用不同的滤波器于支架上，即可实现滤波。

2. θ 调制及现象观察：

(1) 使用 θ 调制滤波器：根据预想的各部分图案所需要的颜色，使用提供的 θ 调制滤波器（三色滤片滤波器）实现指定的分区着色 – 蓝天、红色天安门、绿地。首先，安装 θ 调制滤波器到滤波器支架上；然后，调整 θ 调制滤波器的正反上下左右位置，使得调制器上的三色滤片与频谱面花样的指定分支相匹配；此处要求，频谱面花样中的三个衍射方向上，应当让天安门图案对应的一组衍射谱匹配红色的滤片（即让红色通过），草地对应的一组衍射谱条匹配绿色的滤片（即让绿色通过），天空对应的一组衍射谱条匹配蓝色的滤片（即让蓝色通过）。调整后，在后面白屏上观看经编码得到的假彩色像，效果应为如图 c。

(2) 使用自制滤波器：在实验过程中，可以使用提供的 θ 调制滤波器，也可以在实验室中找一张硬纸片，将硬纸片放在频谱面上并分别标记三个方向需要滤波通过的颜色，然后在标记点扎孔并挖去要通过地部分（参考  图 9），重新放回频谱面，即可观察滤波效果。如果白光光源是 LED 光源，其光谱中的绿光成分可能会很弱，不易提取；可酌情考虑

提取黄颜色来代替绿颜色。

【思考题】

实验中使用的天安门城楼光栅本身中的城楼的窗户和门洞都是透光的,但是为什么经过所提供的假着色滤波处理后所成的像中这些窗户和门洞是黑色的?有方法验证你的解释吗?

【参考文献】

- [1] 轩植华, 霍剑青, 姚焜, 张淑贞; 大学物理实验 (第三册, 第二版), 高等教育出版社, 2006 年。
- [2] 梁家惠, 李朝荣, 徐平, 唐芳; 基础物理实验, 北京航空航天大学出版社, 2005 年。
- [3] 王惠棣, 柴玉瑛, 邱尔瞻, 郑永星, 物理实验, 天津大学出版社, 1993 年。
- [4] 钟锡华, 现代光学 (第二版), 北京大学出版社, 2012 年。
- [5] 大恒新纪元科技股份有限公司, 阿贝成像原理和空间调制伪彩色编码实验, 实验讲义。