

《基础物理实验》实验报告

实验名称 傅里叶光学基础 指导教师 左战春
姓 名 陈苏 学号 2022K8009906009 分班分组及座号 1-03-5 号 (例: 1-04-5 号)
实验日期 2023 年 12 月 18 日 实验地点 教学楼 705 调课/补课 ☐ 是 成绩评定

实验目的

1. 理解现代光学中的成像过程, 频谱面, 谱空间与实空间对应关系, 空间滤波等物理概念;
2. 搭建阿贝成像实验光路和观察不同空间滤波器的效果, 掌握一维导轨上光路的调节;
3. 在阿贝成像实验的基础上组织和搭建光学 4F 成像系统, 进一步体会更为复杂的光学信息处理;
4. 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, 实现特定图像的假彩色编码;
5. 观察光路中透射光栅的衍射光斑图样, 计算光栅常数;
6. 学习光栅光谱仪的使用原理, 并测定特定光谱的结构.

实验仪器

1. 实验平台: 一维光学导轨;
2. 激光器组件: 半导体激光器 ($\lambda = 650\text{nm}$), 一维平移台, 宽滑块, 支杆和套筒;
3. 扩束镜和准直镜组件: 凹透镜 ($f = -10\text{mm}$), 凸透镜 ($f = -80\text{mm}$), 透镜架, 滑块, 支杆和套筒;
4. 光栅字组件: 光栅字 (10 线/mm), 滑块, 支杆和套筒;
5. 变换透镜组件: 凸透镜 ($f = 175\text{mm}$), 透镜架, 滑块, 支杆和套筒;
6. 滤波器组件: 滤波器 (低通, 方向滤波), 精密平移台, 干板架, 滑块, 支杆和套筒;
7. 白屏组件: 白屏, 干板架, 滑块, 支杆和套筒;
8. 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;
9. 调制物组件 A: 天安门光栅 (100 线/mm), 干板架, 滑块, 支杆和套筒;
10. 自制光栅用具: 小刀, 白纸, 铅笔, 塑料垫板;
11. 调制物组件 B: 光栅 (100 线/mm), 干板架, 滑块, 支杆和套筒;
12. OTO SE1040 便携式光栅光谱仪, 配套电脑和软件.

实验原理

1. 阿贝成像原理与空间滤波实验

阿贝成像原理体现了以光场为核心, 在“物”, “像”, 透镜之间进行变换操作的现代光学的概念, 其核心思想是麦克斯韦方程组演化出来的波前传播规律. 具体来说, 就是将整个成像过程分为两步:

第一步, 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衍射斑, 这些衍射斑就是“物”信息与光场卷积后的变换花样;

第二步, 这些携带了“物”信息的频谱斑成为新的相干光源, 再通过光场的传播在像平面实现退卷积, 从而实现干涉成像.

在这种图像下, 无论是光场的自由传播, 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变换; 而频谱面和像面上的图像都是“物”的信息经过透镜变换和光场传播后在特定位置形成的特定波前.

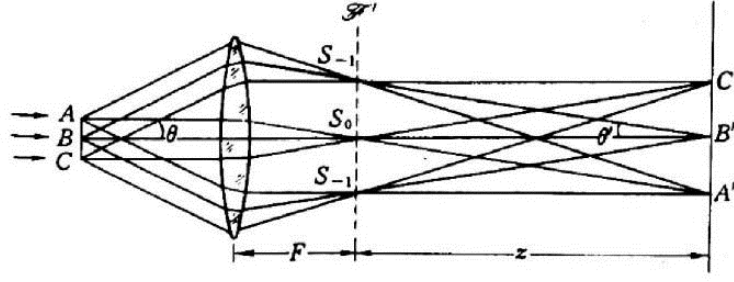


图 1 阿贝成像原理图

阿贝成像原理在波动光学概念的基础上引入傅里叶变换, 与频谱面, 频谱花样与物信息相关联. 如图 1 所示, 物, 透镜, 频谱面和像面都在 xy 平面内, 透镜焦距为 F , 单色相干光源波长为 λ . 任意物对于一个单色平行入射的相干光源的调制, 可以理解为一系列沿空间方向变化的余弦光栅的总和. 先考虑沿 x 方向的变化, y 方向可以与此相类比. 设这些不同频率的余弦光栅的空间频率为 f_i , 物光波波前为

$$U_{ab}(x, y) = \sum_i A_i(t_0 + t_i \cos(2\pi f_i x)).$$

考虑其中一个单频信息 f_i , 经过物镜变换后, 将会在频谱面上形成三个衍射斑, 分别记为 S_0, S_{+1}, S_{-1} . 其中 S_0 处于 xy 平面的中心, 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

$$S_{\pm 1} = \pm F \tan \theta_i,$$

其中 $\sin \theta_i = f_i \lambda$. 这三个相干点光源成为新的次级光源, 发出的光场复振幅分别为

$$\begin{cases} A_0 \propto A_1 t_0 e^{ikL(BS_0)}, \\ A_{+1} \propto A_1 t_i e^{ikL(BS_{+1})}, \\ A_{-1} \propto A_1 t_i e^{ikL(BS_{-1})}. \end{cases}$$

这三个新光源的相干光在像面形成干涉, 其干涉像场的复振幅即为

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

根据以上讨论, 可以得知:

- (1) 物原本的单频信息 f_i 可以在像面重构为相似的空间频率为 f'_i 的信号, 其比值 $V = f'_i / f_i$ 称为放大率;
- (2) 由于一个一般的物的调制是一系列 f_i 信号的组合, 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 对应物信息中的 $f = 0$ 的信息, 其位置处于原点; 正负两方向的衍射点 $S_{\pm 1}$ 对应指定频率 f'_i 的信息, f_i 越大, 衍射角 θ_i 就越高, $S_{\pm 1}$ 离中心就越远.

2. 光学 4F 成像系统

如图 2 所示, 4F 成像系统使用两个透镜依次实现傅里叶变换和反傅里叶变换, 把成像要素与频谱操作要素分离开. 在 4F 图像处理系统下, 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. 由于物场函数处于透镜 1 (傅里叶变换透镜) 的焦距处, 因此其像面位置在傅里叶变换透镜后无限远处, 即 $z = \infty$, 经透镜 2 后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与物场函数相同的.

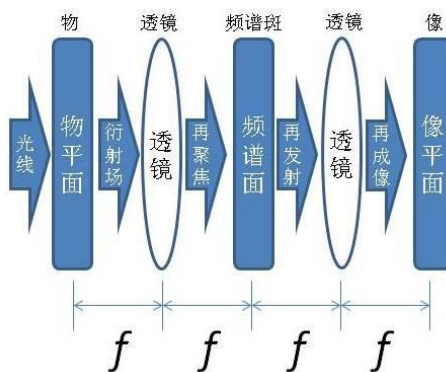


图 2 光学 4F 成像原理图

用一束平行光照射透明物，物置于透镜 1 (傅里叶变换透镜) 的前焦面处，透镜 1 后焦面上即得到物函数的频谱。透镜 1 的频谱面又位于透镜 2 (反傅里叶变换透镜) 的前焦面上，透镜 2 后焦面上即得到频谱的傅里叶逆变换。这样，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。

3. 假彩色编码

如图 3 所示，透明天安门样品如图 3 所示。天空，天安门，草地三个区域覆盖了通过三次分别曝光预制的不同方向的光栅刻线，其空间频率为 100 线/mm。当白光光源照射透明样品 (物面上的被调制物) 时，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) 的光栅方向不同，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。可以选择两种调制方法：

(1) 使用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，最终呈现出彩色图样；

(2) 使用一张打孔的白纸，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。



图 3 透明天安门样品图

4. 光栅衍射

记光栅相邻两缝中心的距离为 d ，用 θ 表示从干涉图样中心到第 m 级衍射极大之间的夹角， λ 为光的波长，则有光栅方程

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

测出光栅各级的衍射角即可计算光栅常数 $1/d$ 。

5. 光栅光谱仪

光栅光谱仪是用光栅作为色散元件的分光仪器，利用光栅将成分复杂的光分解为沿不同方向的单色光，可用于产生单色光或分析光源的光谱等，兼具测量的速度和便携性。实验中用光栅光谱仪测量白光的光谱结构。

实验步骤与实验数据

1. 阿贝成像原理与空间滤波实验

(1) 将激光器和白屏固定于一维光学导轨上, 将激光器置于导轨一端, 白屏置于导轨另一端底部. 调整激光器出光口到支杆顶部距离为 90mm, 调试平移台及激光器俯仰使其沿导轨中心水平传播. 调节激光器水平的方法为: 将光阑调节到与激光器输出光斑大小相同, 反复调节激光器朝向和光阑高度, 使得前后移动光阑时, 激光总能刚好从光阑中心通过.

(2) 安装扩束镜, 上下调整支杆使扩束光斑中心与原来的中心重合, 将其固定.

(3) 在距离扩束镜大约 70mm 处安装准直镜. 水平调节准直镜的位置, 直到通过准直镜的激光光束在近处和远处的光斑大小大致, 此时输出平行激光光束.

(4) 安装光栅字, 上下调整支杆使光斑中心正入射“光”字.

(5) 在距离光栅字约 240mm 处安装变换透镜. 上下调整支杆使“光”字从变换透镜中心通过. 再前后移动变换透镜, 直到在白屏上看到清晰的放大倒立实像, 将其固定. 安装好的装置如图 4, 图 5 所示.



图 4 阿贝成像原理装置总体图



图 5-1 阿贝成像原理未处理的光栅字

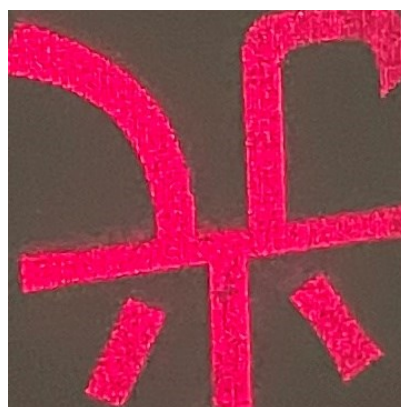


图 5-2 未处理的光栅字细节图

在变换透镜后安装滤波器, 使其与变换透镜的距离约为 170mm. 沿导轨前后移动滤波器, 使得上面的图像最清晰, 即为透镜变换后的频谱面位置. 将滤波器狭缝的方向分别调整为水平, 垂直和 45° 倾斜, 观察白屏上像的变化. 滤波装置如图 6 所示, 频谱面如图 7 所示, 变换后白屏上的像如图 8-10 所示.

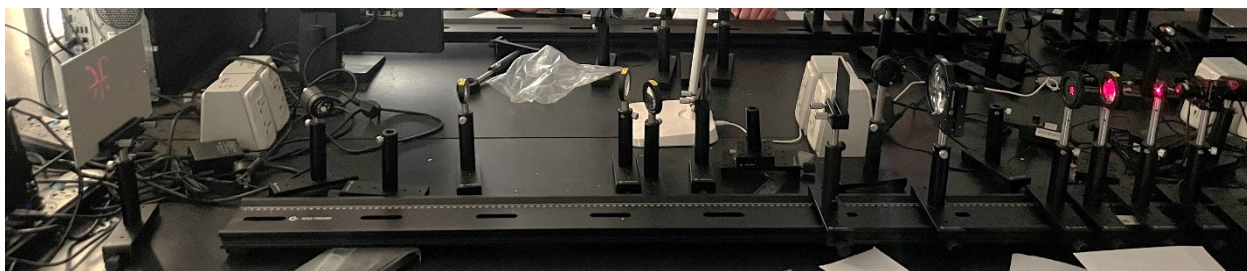


图 6 阿贝成像原理滤波装置总体图

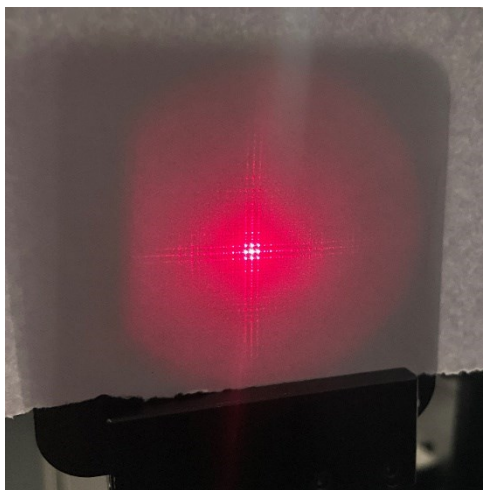


图 7 阿贝成像原理频谱面图



图 8-1 阿贝成像水平方向滤波光栅字



图 8-2 水平方向滤波光栅字细节图

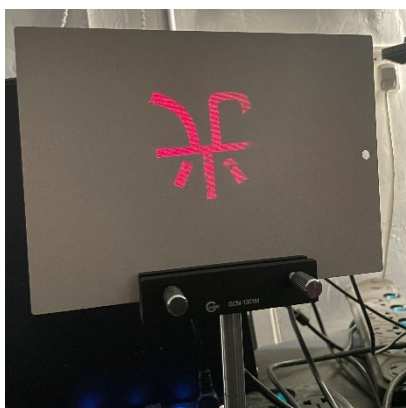


图 9-1 阿贝成像垂直方向滤波光栅字



图 9-2 垂直方向滤波光栅字细节图

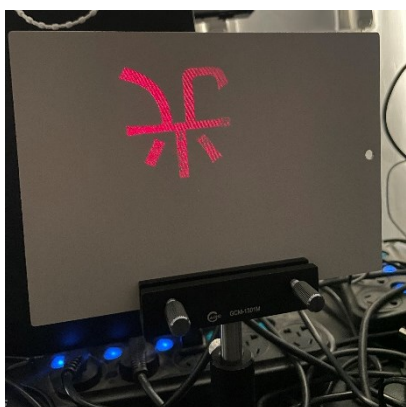


图 10-1 阿贝成像 45°倾斜方向滤波光栅字

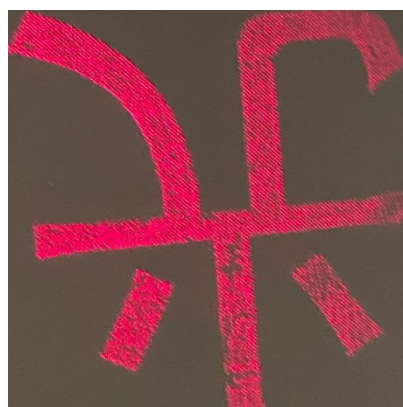


图 10-2 45°倾斜方向滤波光栅字细节图

再将小孔作为滤波器，观察白屏上像的变化。频谱面如图 11 所示，变换后白屏上的像如图 12 所示。

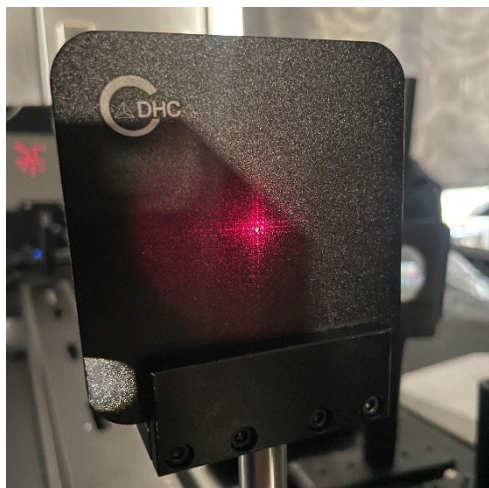


图 11 阿贝成像小孔低通滤波频谱面图

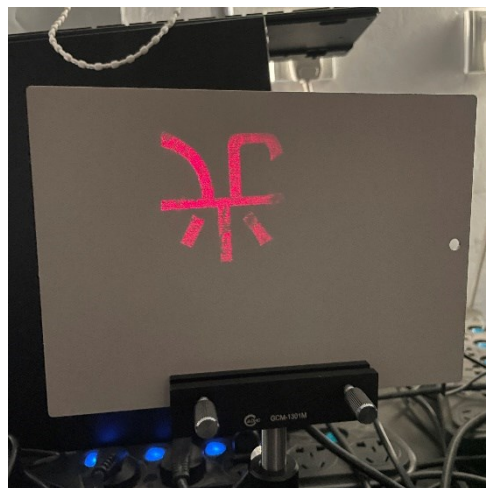


图 12 阿贝成像小孔低通滤波光栅字

由图可知，在不安装滤波器时，白屏上观察到倒立放大的实像，既有水平的条纹也有竖直的条纹。在光路中加入滤波器后，如果狭缝水平放置，像有竖直的条纹；如果狭缝竖直放置，像有水平的条纹；如果狭缝 45° 倾斜放置，像有反向 45° 倾斜的条纹。

如果选择小孔作为滤波器，像中间没有条纹，只剩下“光”字的轮廓。

2. 4F 系统成像

拆除实验 1 光路中的变换透镜和滤波器，在光栅字后方放置透镜 1 (傅里叶变换透镜, $f = 150\text{mm}$)，上下调整支杆使光束从透镜中心通过，移动透镜 1 使得光栅字位于其焦点处。在透镜 1 后方放置透镜 2 (反傅里叶变换透镜, $f = 150\text{mm}$)，上下调整支杆使光束从透镜中心通过。移动透镜 2 使其与变换透镜 1 的距离为 $2f = 300\text{mm}$ 。

移动白屏使其与变换透镜 2 的距离约为 $f = 150\text{mm}$ 左右，微调各部分位置，使得在光屏上得到清晰的像。安装好的装置如图 13 所示，白屏上的像如图 14 所示。

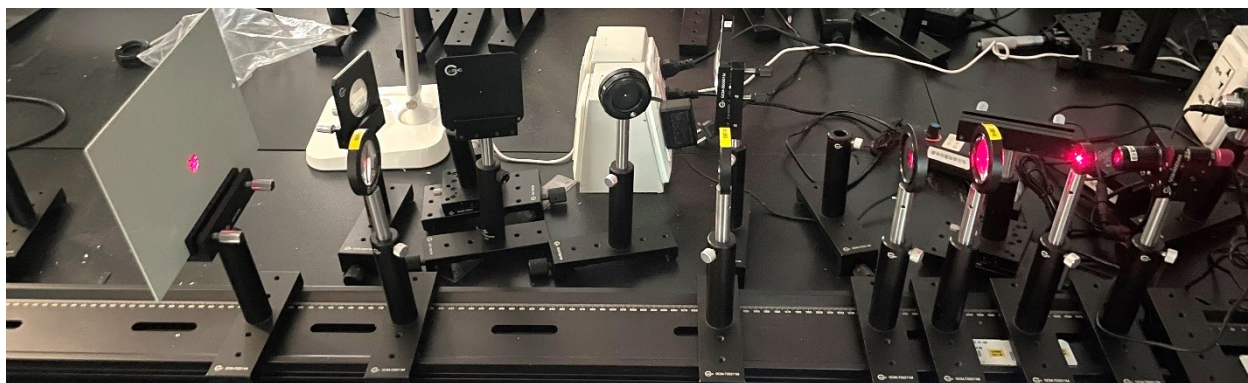


图 13 4F 系统成像装置总体图

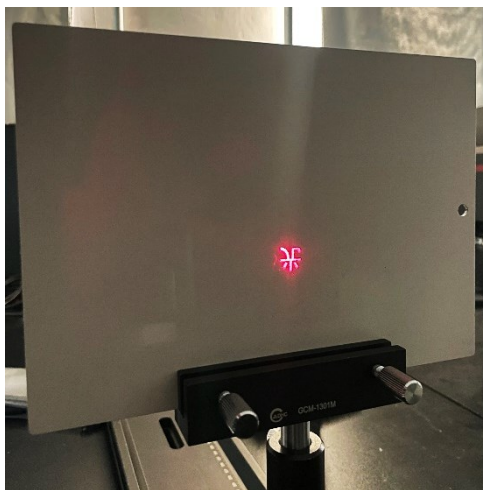


图 14 4F 系统的光栅字像

将光栅字替换为在白纸上自制的图画，安装好的装置如图 15 所示，白屏上的像如图 16 所示。

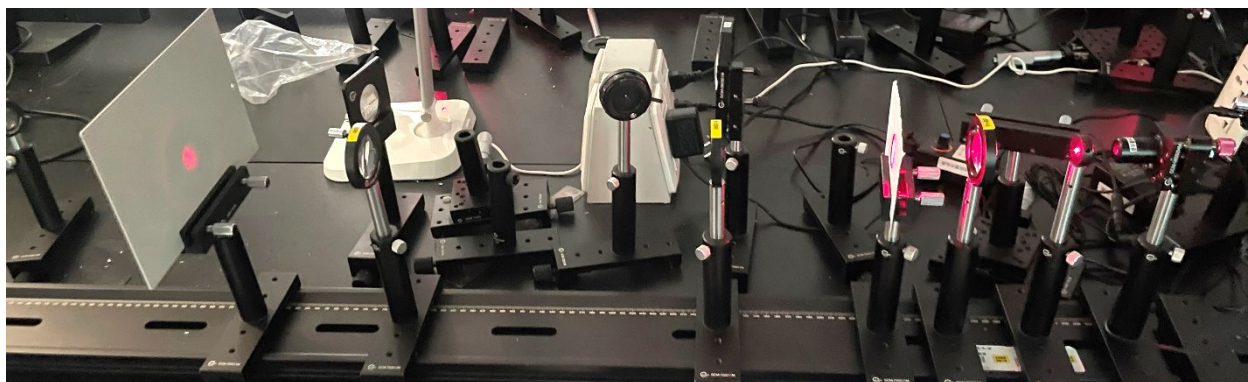


图 15 4F 系统自制纸上图画成像装置总体图

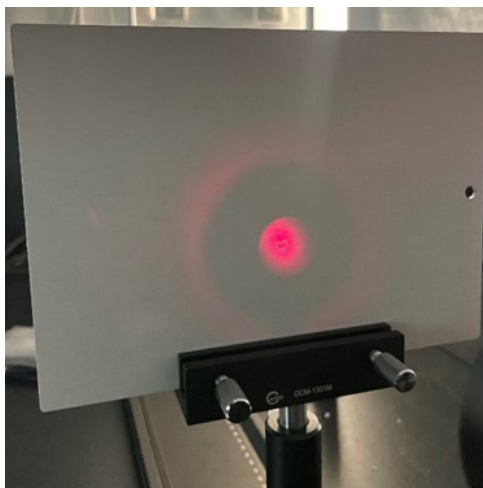


图 16 4F 系统自制纸上图画的像

撤去变换透镜 2 (反傅里叶变换透镜)，重新观察光栅字和自制纸上图画的像，装置如图 17 所示。

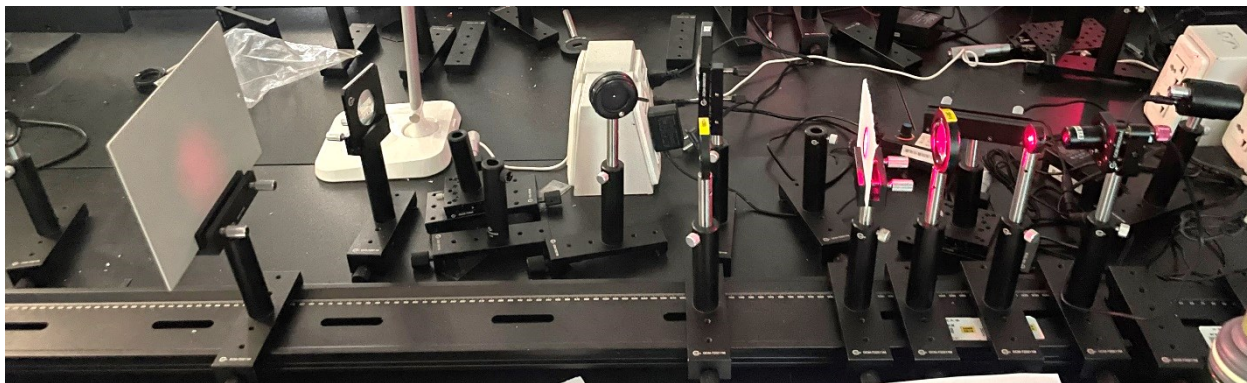


图 17 缩减后 4F 系统装置总体图

由图可知, 4F 系统可以成等大倒立的清晰像. 在撤去透镜 2 (反傅里叶变换透镜) 后, 系统成像远不如前.

3. 假彩色编码

(1) 将白光 LED 和白屏固定于一维光学导轨上, 将 LED 置于导轨一端, 白屏置于导轨另一端底部. 调整 LED 中心到支杆顶部距离为 90mm.

(2) 在距离 LED 大约 80mm 处放置准直镜, 调节准直镜的高度, 使得 LED 光源发光点与准直透镜的中心水平对齐. 水平调节准直镜的位置, 直到通过准直镜的白光光束在近处和远处的光斑大小大致.

(3) 安装天安门光栅, 上下调整支杆使光斑正入射天安门中心, 将其固定. 注意为使天安门像是正立的, 天安门光栅应倒立放置.

(4) 在距离天安门光栅约 160mm 处安装变换透镜, 上下调整支杆使入射光尽可能从变换透镜中心通过, 此时在白屏上可观察到模糊像. 前后移动白屏直到能看到放大倒立实像.

(5) 安装滤波器, 使其与变换透镜的距离约为 160mm. 沿导轨前后移动滤波器, 使得上面的图像最清晰, 即为透镜变换后的频谱面位置. 调整滤波器的角度, 使得天安门光栅的像呈现彩色, 即天空为蓝色, 城楼为红色, 地面为绿色. 安装好的装置如图 18 所示, 频谱面如图 19 所示, 白屏上的彩色像如图 20 所示.

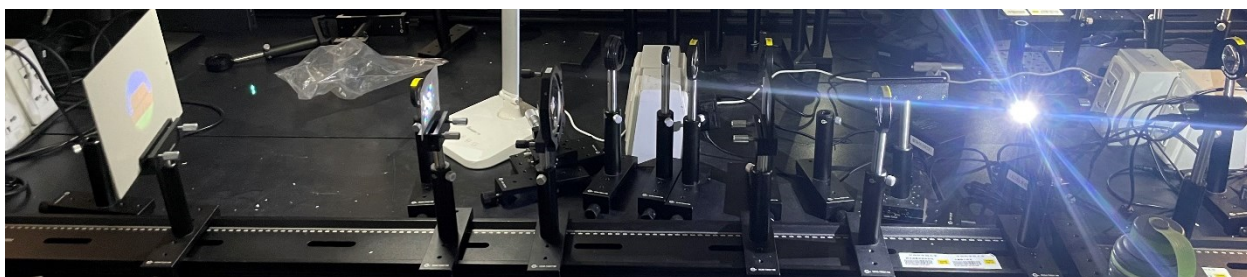


图 18 假彩色装置总体图

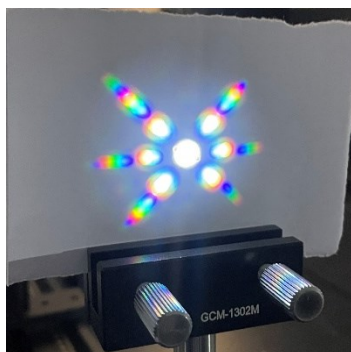


图 19 假彩色装置天安门光栅的频谱图

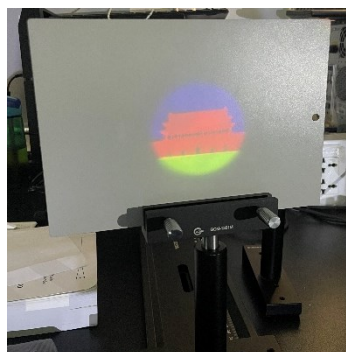


图 20 假彩色装置天安门光栅的彩色像

除此之外，还可以自制一块滤波器.将白纸覆盖在频谱面上，用铅笔描出衍射图样，选取对应于天空，城楼和地面的衍射谱的方向，用小刀切开豁口，分别只让对应方向的蓝光，红光和绿光通过，得到一个简单的滤波器. 将其单独置于频谱面上，观察白屏上的像. 安装好的装置如图 21 所示，白屏上的彩色像如图 22 所示.

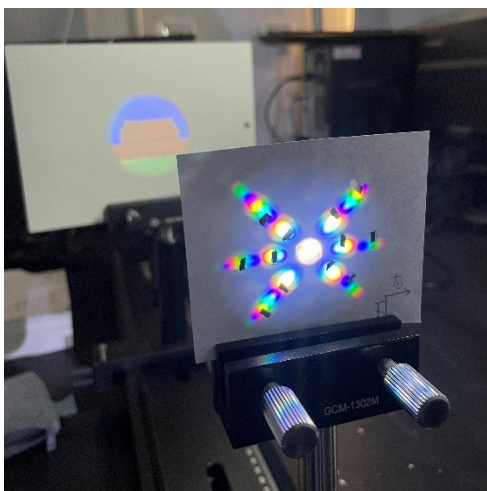


图 21 假彩色装置自制滤波器装置图



图 22 假彩色装置自制滤波器天安门光栅的像

将滤波器中心打开，使得低频信号通过. 安装好的装置如图 23 所示，白屏上的彩色像如图 24 所示.

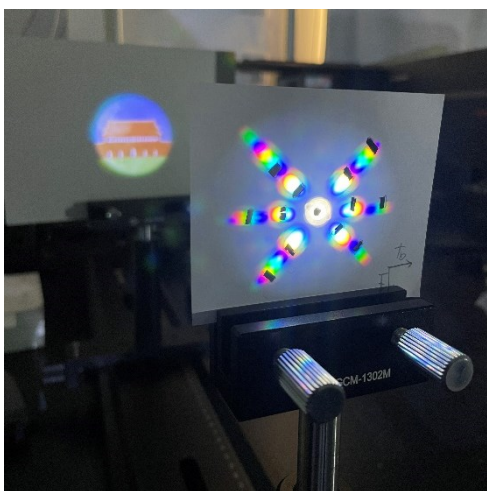


图 23 假彩色装置自制低通滤波器装置图

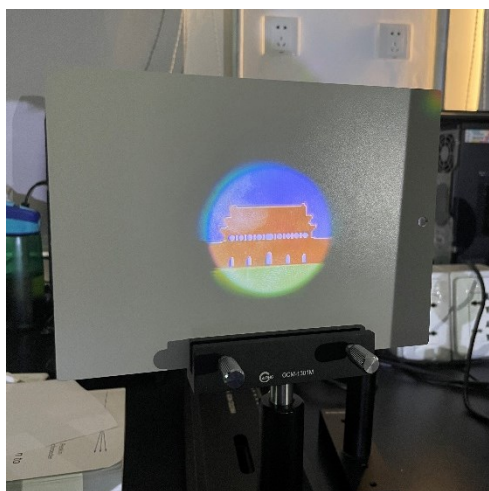


图 24 假彩色装置自制低通滤波器天安门光栅的像

4. 光栅衍射

将激光器和白屏固定于一维光学导轨上，将激光器置于导轨一端，白屏置于导轨另一端底部. 调整激光器出光口到支杆顶部距离为 90mm，调试平移台及激光器俯仰使其沿导轨中心水平传播. 调节激光器水平的方法为：将光阑调节到与激光器输出光斑大小相同，反复调节激光器朝向和光阑高度，使得前后移动光阑时，激光总能刚好从光阑中心通过.

在光源和白屏中间垂直安装光栅，使得激光穿过光栅在白屏上成衍射像. 前后调节白屏使其处于合适的接收像的位置，并测量各级衍射光斑之间的距离. 安装好的装置如图 25 所示，白屏上的衍射像如图 26 所示.

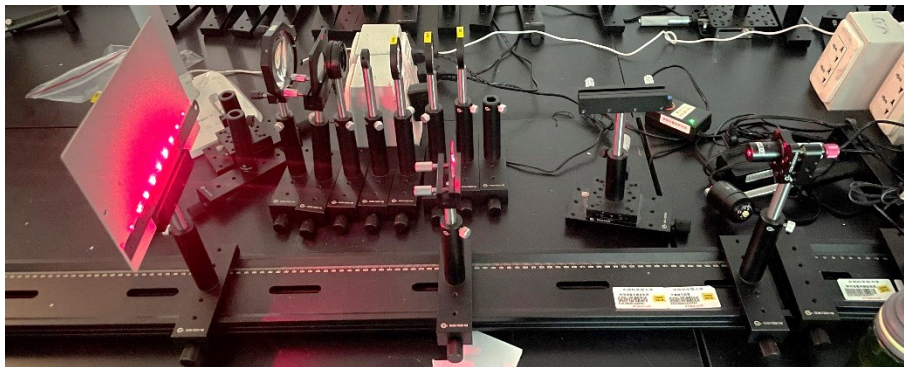


图 25 光栅衍射装置图



图 26 光栅衍射像

表 1 各级次衍射斑位置测量表

衍射级数	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
位置/cm	2.4	4.5	6.5	8.5	10.4	12.3	14.4	16.4	18.5

实验中白屏与光栅的距离为 300mm, 由

$$d \sin \theta = m\lambda,$$

可知 $\lambda/d = 0.67$, 代入 $\lambda = 650\text{nm}$, 计算得光栅常数约为 100.

5. 光栅光谱仪

将白光 LED 光源和光栅光谱仪的光纤输入端固定在一维光学导轨上, 使光纤能够较为稳定地接收白光. 将光栅光谱仪连接计算机, 用 SpectraSmart 软件测量白光光谱, 并进行数据处理, 如图 27, 28 所示. 在光纤和白光之间放置蓝色, 红色和绿色的滤波器, 分别重复测量, 如图 29-34 所示.

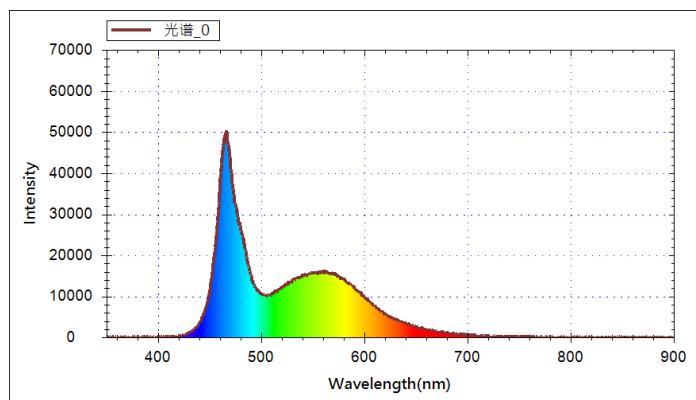


图 27 LED 白光光谱

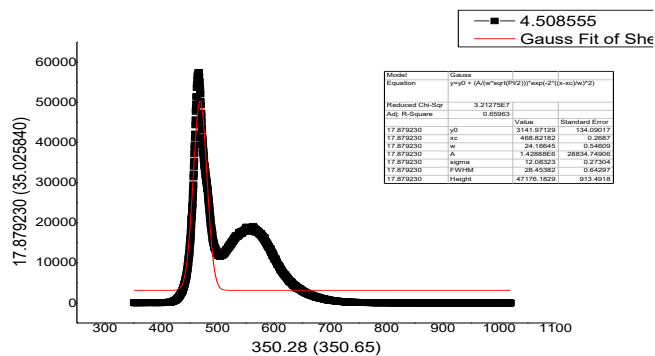


图 28 LED 白光光谱数据处理

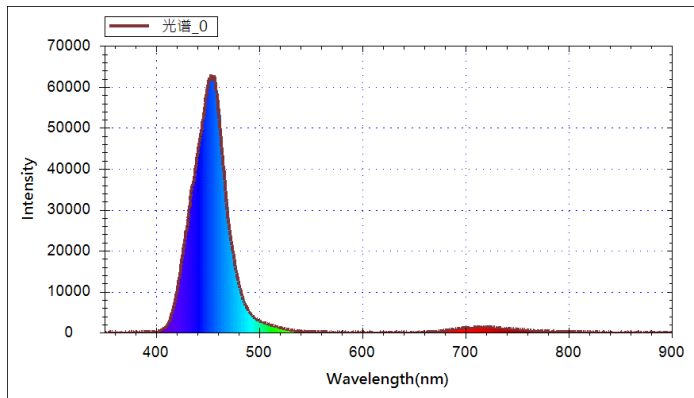


图 29 LED 经蓝色滤波片后光谱

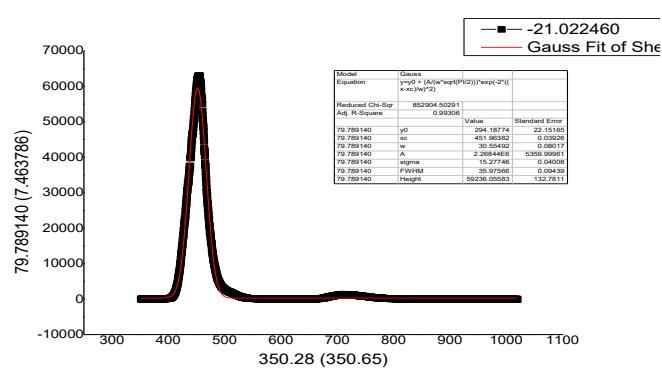


图 30 LED 经蓝色滤波片后光谱数据处理

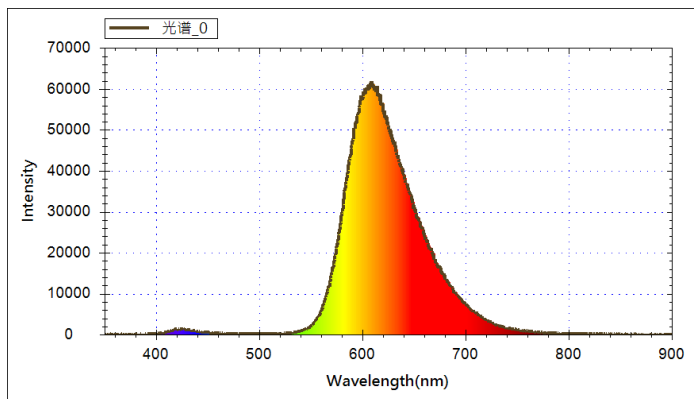


图 31 LED 经红色滤波片后光谱

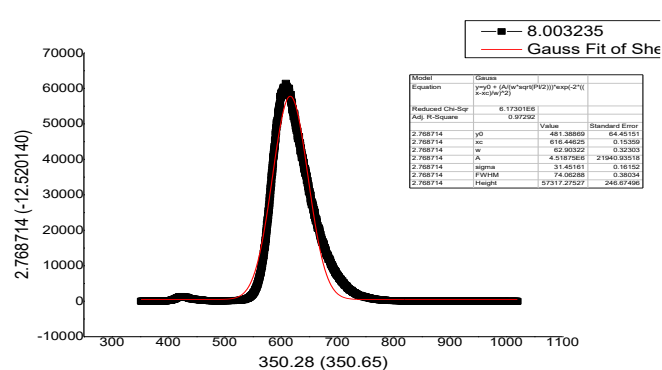


图 32 LED 经红色滤波片后光谱数据处理

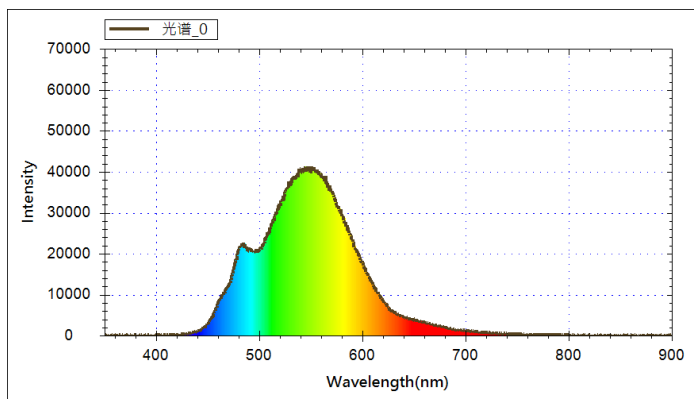


图 33 LED 经绿色滤波片后光谱

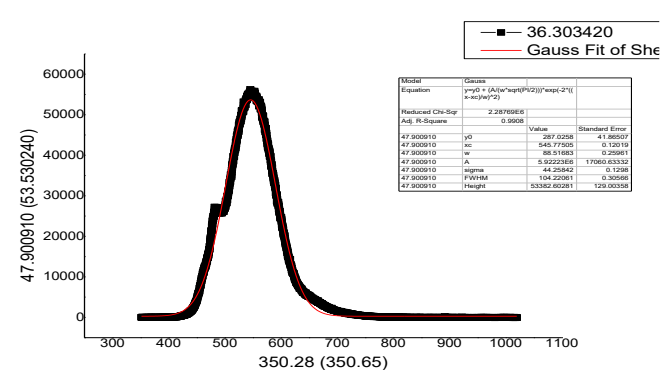


图 34 LED 经绿色滤波片后光谱数据处理

测量得各色光线光谱的分布中，峰值波长及展宽。

表 2 各色光线光谱的分布特征测量表

	峰值波长/nm	展宽/nm
白光 (总光谱)	468.82182	24.16645
蓝光	451.96382	30.55942
红光	616.44625	62.90322
绿光	545.77505	88.51683

可以看到，在白光通过特定颜色的滤波器后，光谱中该频率的光占比显著上升，而其他颜色的光几乎被滤波器吸收。

实验结论

傅里叶光学是现代光学的核心部分之一，理解和应用傅里叶变换的原理意义深远。本实验重视实验现象的观察理解，从阿贝成像原理和空间滤波实验逐渐深入，介绍了空间和频谱面上的操作方法。

阿贝成像原理和空间滤波实验中白屏上的条纹不够清晰且明暗不一致，可能是激光器发出的光束不够均匀，以及透镜组的球差导致的。且由于透镜的直径有限，且表面沾染了灰尘，白屏上还出现了不该有的衍射斑。4F 系统和假彩色编码实验中同样出现了类似的问题。

假彩色编码实验中的光斑对于不同颜色光的衍射角不尽相同，在天安门光栅和变换透镜距离 150-200mm 时效果最好。由于滤光片轻微漏进了其他颜色的光，而自制的纸质滤波器对于波长的选择更精确，自制的滤波器效果更好，但也更暗一些（如图 22）。在开放中心低频光进入后，相当于加上很强的背景光，城门和窗户等部位都被照亮了（如图 24）。

便携式光栅光谱仪可以很方便地测量光谱，数据拟合后可以用来观测温度等特征量。美中不足之处是 CCD 能容忍的最大光强很小，不能用来测量激光。

附录: 预习报告

基础物理实验预习报告

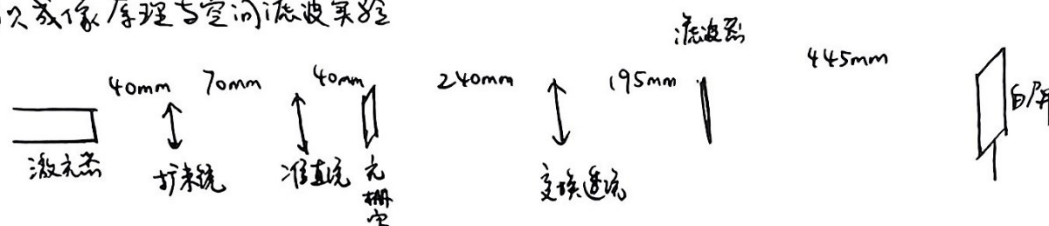
实验名称: 傅里叶光学基础

姓名: 陈苏 学号: 2022K8009906009 组号: 1-03-5

日期: 2023年12月18日 地点: 教二楼

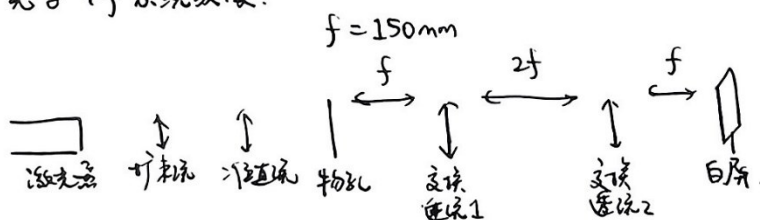
实验原理

1. 阿贝成像原理与空间滤波实验



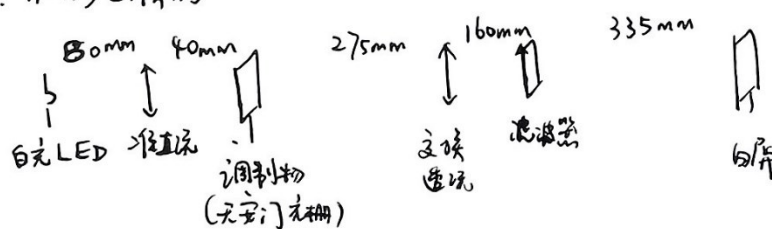
激光经过扩束镜和准直镜后成为平行光, 通过光栅后成像于白屏。

2. 光学 $4f$ 系统成像.



经过物孔后在白屏上成等大倒立的像。

3. 假彩色编码



白光经过天窗门栅后被分解为彩色光, 经透镜滤波挑选, 在白屏上呈现特殊颜色。