

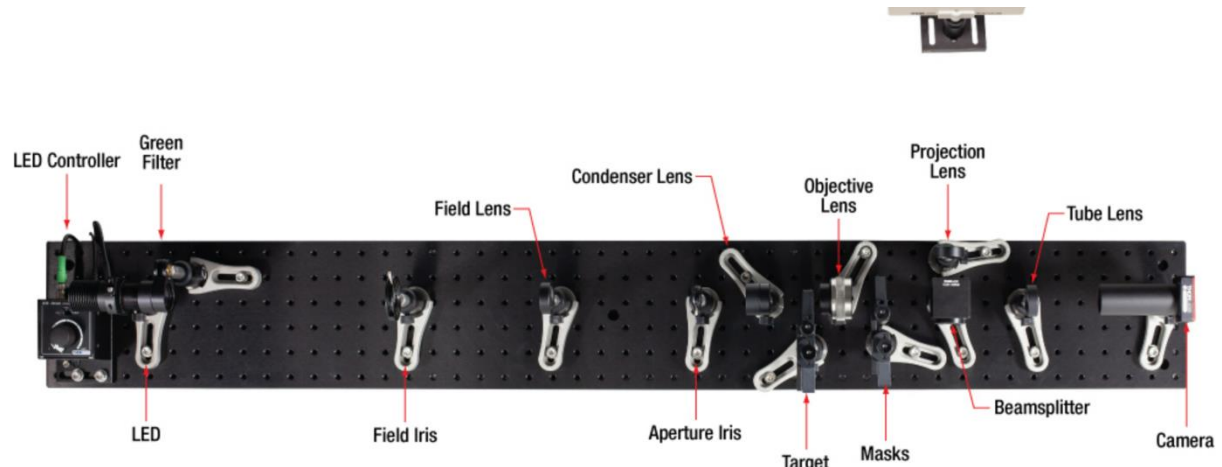
傅里叶光学教学套件

目录

一. 主要内容	2
二. 整体光路调节步骤	4
三. 实验内容	12
实验 1: 开普勒望远镜 (Filed lens+ Condenser lens)	12
实验 2: 开普勒望远镜 (Condenser lens+ Objective lens)	12
实验 3: Projection lens 成像 (对应傅立叶面)	13
实验 4: 观察傅里叶面 (观察屏上)	13
实验 5: Field Iris 和 Aperture Iris 在光路中的作用	13
实验 6: 直接观察 Objective lens 后的傅里叶面	14
实验 7: Projection lens 成像	14
实验 8: 光学滤波	14
实验 9: 巴比内原理	15
实验 9: 图像编辑	15
柔焦	15
暗场成像—图案	16
暗场成像—生物样品	16
实验 10: Inverse Fourier Target	17
实验 11: 衍射极限分辨率	17

一. 概述

整体光路（4f 光学装置，科勒照明，无限远矫正显微镜）：



Collector Lens: 已直接安装在 LED 前面；用来准直 LED 光，同时在尽可能小的面积上获得尽可能大的光强度用来照明。

Illuminating Optics: 原则上，Field lens 和 Condenser lens 放置时焦平面一致，组成开普勒望远镜（此设置中应为 3 倍放大倍率）。由于我们将望远镜向后使用，使 Field lens 对准光源，因此 Condenser lens 后的照明面积只有原面积的三分之一，但总照明强度不变。

Imaging Optics: Objective lens 和 Tube lens 组合形成了装置的成像光学元件，使物体在相机上成像。由于物体位于物镜的一个焦平面上，因此可以在物镜的另一个焦平面上观察到物体的傅里叶图像。当两个 lens 的焦平面重合时，可以实现五倍放大倍率，即无限远校正显微镜。由于物体位于物镜的焦平面内，可以假设平行光束在物镜后面传播。因此，Tube lens 可以设置在距物镜的任何距离处将图像聚焦到相机上。

Projection Lens: 傅里叶图像位于物镜的后焦平面上。该后焦平面（或傅里叶图像）经过 Projection Lens 和分束器显示在观察屏上。图像的显示和放大倍率遵循透镜方程。当 Projection Lens 放置在某个位置时，屏幕上的图像仅在一定的屏幕距离处清晰。放大倍率对应于图像距离与物体距离的比值。

Green Filter: 白光在小特征结构物体上的衍射导致光在衍射图中的光谱分裂。使用绿色滤光片来防止光谱分裂，从而防止傅里叶图像中衍射最大值的扩展。减小衍射最大值的范围使过滤傅里叶图像更容易。但是，请注意，此处显示的所有衍射效应也发生在白光下。

Field Iris: 打开和关闭 Field Iris 会使 Condenser lens 后面物体上的照明区域变大或变小。这是因为由 Filed lens 和 Condenser lens 组成的开普勒望远镜的位置使其在物体平面上投射出 Filed lens 的清晰图像。此外，改变 Filed lens 的开口可以改变傅里叶图像的亮度。

Aperture Iris: 通过 Condenser lens 的光强度可以直接通过 Aperture Iris 进行控制。这意味着打开 Aperture Iris 会增加物体的强度，因为更多的光落在 Condenser lens 上。此外，Aperture Iris 在傅里叶平面上由 Condenser lens 和物镜的组合表示。因此，傅里叶图像是 Aperture Iris 图像和物体衍射图案的叠加。这意味着 Aperture Iris 的开放程度与傅里叶图像中强度最大值的程度相关。

实验内容中提到的 Target 和 Mask 上的特征图案：

This is a sketch of the target supplied with this kit (outer diameter sector star: 3 mm):

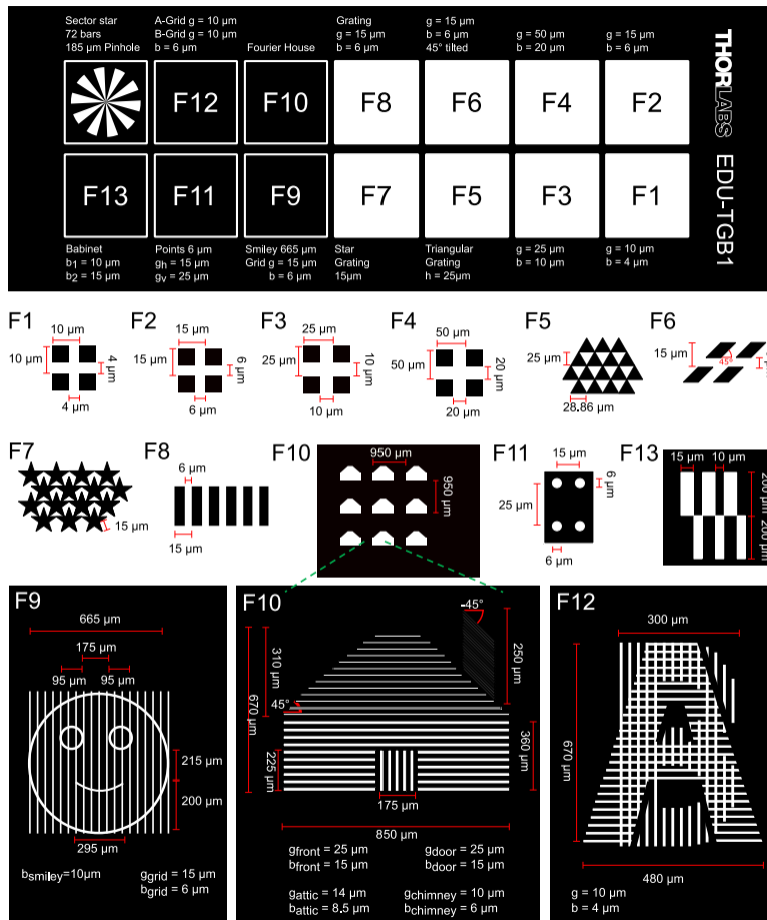
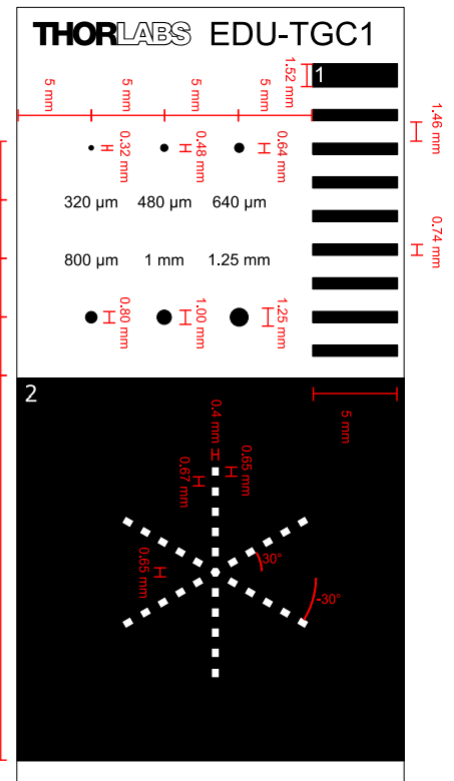


Figure 31: Target EDU-TGB1 with Detail Drawings for Each Section

Figure 32: The EDU-TGC1 Cutting Mask: the red lines and red labels are not part of the mask.



二. 整体光路调节步骤

1. 定高:

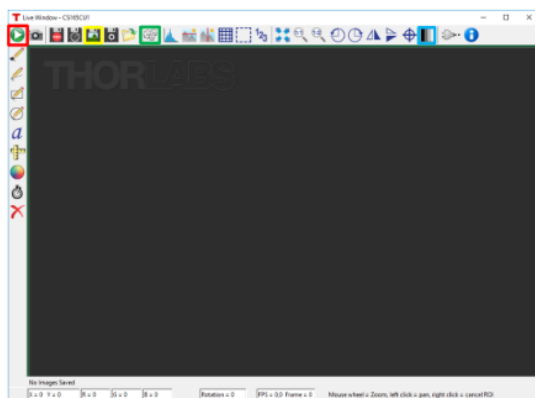
将所有安装好的组件的高度（从面包板到光学元件中心）设置为 10cm（可以使用 LMR1AP 对准靶和尺子），其中翻转安装座侧向翻转；组件允许的高度范围为 9–11cm；

2. 相机和套筒透镜安装:

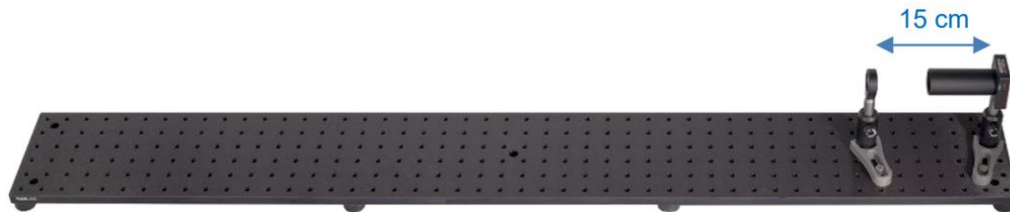
- 将相机固定在面包板的右端，安装位置为从用户靠近的面板长边算起的第四排孔线（后续安装各个组件时会沿着这一排螺纹孔，方便对齐）；



- 打开相机软件并点击 Live button 运行相机；



- 将套筒透镜（ $f = 150 \text{ mm}$ ）放置在距相机芯片约 150 mm 处，沿同一孔线放置。

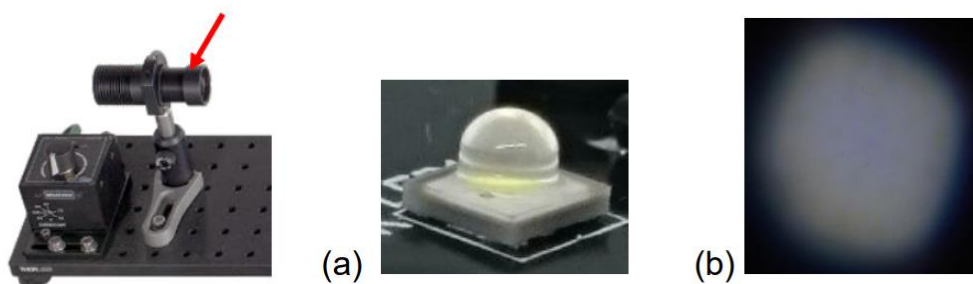


- 将远处的物体清晰的成像在相机上（注意检查实验室光线以及适当调整相机的曝光时间，常用下两种方式：最后固定套筒透镜时请注意和相机组件对齐）：
 - 移动面包板使其指向房间另一侧距离至少 4 m 远的物体，前后移动套筒透镜的位置，直到在相机上看到物体的清晰图像，然后固定套筒透镜；
 - 如果面包板不方便移动，可以添加一个分束器对光路进行转向。将分束器（以正确的方向）放置在距管透镜约 10 厘米的位置，并用卡扣盖遮挡透

射光束的路径。此时相机可以对垂直于面包板方向的远处物体进行成像；再次前后移动镜筒镜头，直到在相机上看到远处物体的清晰图像，然后固定套筒透镜；

3. LED 光源的准直和调节：

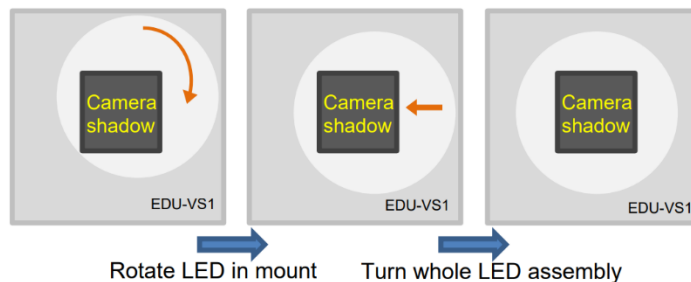
- 将 LED 对准墙壁或天花板，旋转调节安装在 LED 前面的透镜的位置（下左图），直到可以看到 LED 芯片（黑点图案）；调节完成后，拧紧可变透镜管上的锁定环固定透镜的位置。
 - 调节过程中可以改变 LED 的驱动电流选择合适的亮度方便看到芯片图像；
 - 由于 LED 芯片上有一个塑料圆顶（下 a 图），因此看不到完美清晰的图像（下 b 图）。



- 将观察屏放在相机后面。
- 将 LED 放置在距相机 100 cm 远（接杆与接杆之间的距离）的同一排螺纹孔上。



- 观察观察屏上相机的阴影，阴影可能不在 LED 光锥的中心，如果遇到偏离中心的位置，请按以下方式处理（请勿改变摄像头的高度或 LED 的高度）：
 - 旋转 SM1RC 支架中的 LED，直到光锥中心位于相机阴影的右侧或左侧，然后拧紧 SM1RC 上的固定螺丝；
 - 转动整个 LED 组件，直到相机阴影位于光锥的中心；然后其安装在面包板上与相机同一排的螺纹孔上。



4. 物镜安装:

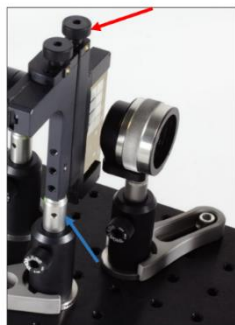
- 将物镜 ($f = 30 \text{ mm}$) 放置在距离镜筒透镜 $18 - 20 \text{ cm}$ 远 (从物镜中心开始测量) 的位置 (如下图, 请注意镜架的朝向应与附图一致);



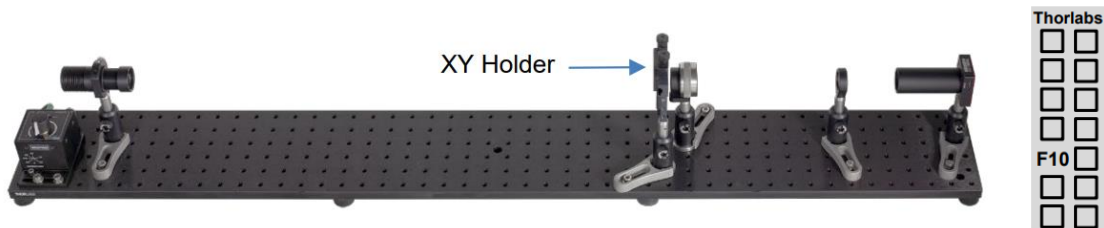
- 旋转 SM1ZM 变焦外壳, 使物镜位于镜架可调距离的中间位置 (即: 可以前后双向移动)。

5. Target 安装

- 顺时针转动 XY 安装座 (XY Holder) 上的高度调节螺钉 (下左图红色箭头所指), 将 Target 向上移动到尽可能高的位置;
- 调整固定 XY 安装座的接杆 (下左图蓝色箭头所指) 高度, 使扇形星 (下中图中的 F14) 与光路的光轴高度相同;



- 将 Target 放置在距离物镜约 2 cm 的位置 (如下图); 前后移动 Target, 直到在相机中获得扇形星的清晰图像 (上右图, 使用相机时注意更改曝光时间, 以免相机饱和), 然后固定, 固定时确保 Target 与整体光路垂直; 如果固定之后发现相机上的图像不再清晰, 可以通过 SM1ZM 微调物镜的位置;



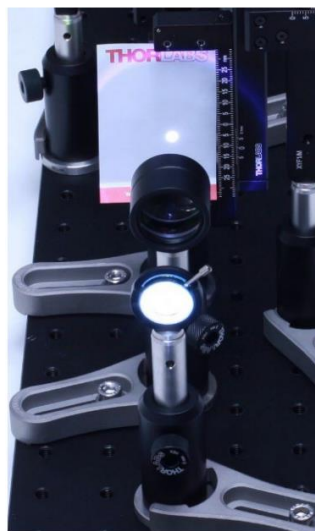
- 调节 XY 安装座上的平移旋钮，将 F10 在相机上清晰成像（九个房屋图案，上右图）

6. Condenser Lens 安装

- 将 Condenser Lens ($f = 50 \text{ mm}$) 放置在距 Target 5 cm（从透镜中心测量）的地方；



- 前后移动 Condenser Lens 并观察 Target 上的光斑大小（可以将一小张纸直接放在 Target 前方，同时调节 LED 强度帮助观察），直到出现最小的光斑；



- 拿掉纸，使得聚焦之后的光斑落在 Target 上 F10（9 个房屋图案）的中心；否则，可以相应的调节 Condenser Lens 的左右和高度；

7. Aperture Iris 安装

- 将 Aperture Iris (ID12/M) 放置在距离 Condenser Lens 约 5 cm（从光阑到 Condenser Lens 中心）的地方；

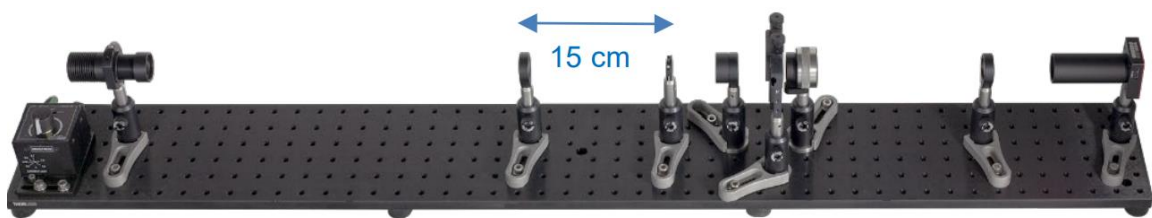


- 闭合光阑并调整其高度，使光阑的阴影在 Condenser Lens 镜架上居中（镜架下边缘的杂散光在下一步中被视场透镜消除）；



8. Filed lens 安装

- 将 Filed lens ($f = 150 \text{ mm}$) 放置在距离 Aperture Iris 约 15 cm 的位置；

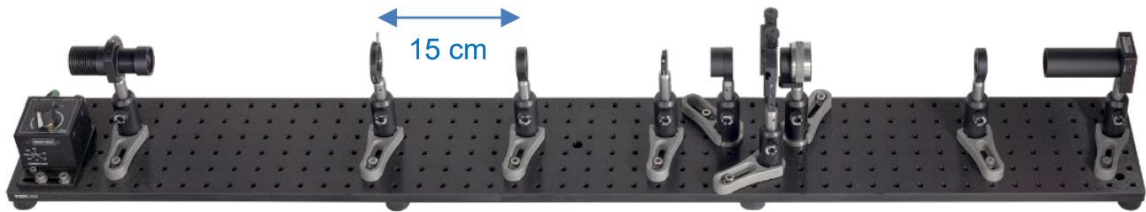


- 在 Aperture Iris 前放一张纸，前后移动 Filed lens，直到在纸张上看到 LED 芯片图像（黑点阵列）；调节过程中可以适当降低 LED 强度（如果很难看到 LED 芯片图像，将 Filed lens 对齐 Aperture Iris 并与其相距 15 厘米就足够了）；
- 调节好距离后检查 Filed lens 的高度，其在 Aperture Iris 的光斑应该居中；

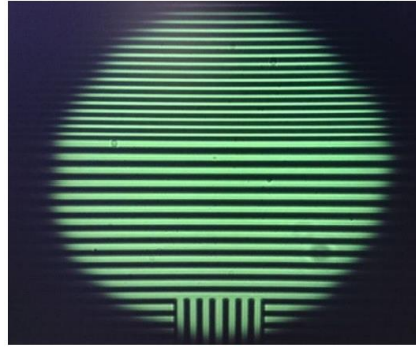


9. Field Iris 安装

- 将 ID25/M Field Iris 放置在距离 Field lens 约 15 cm 处；



- 打开或关闭 Field Iris 检查光阑的高度，通过观察安装座本身或在 Field Iris 镜架上安装 LMR1AP 对准板进行观察，如操作 8 中的第二张图片）；
- 关闭光阑，观察相机上的房屋图像并稍微向前和向后移动 Field Iris。理想情况下，会在相机上看到光阑清晰的图像（大致为多边形）；但是，使用此设置无法获得清晰的图像，观察到如下图的图像即可：



10. Color filter 安装

- 滤光片被翻转放置时正好位于 LED 的前面（近距离可减少杂散的白光），此时滤光片的高度与 LED 前面的透镜的高度应一致；



11. 分束器安装

- 将 Target 上 F12 的位置移动到光路中心，打开 Filed iris 到至 3/4 处，闭合 Aperture Iris；

- 将分束器放置在距离物镜约 8 厘米（物镜和分束器安装座之间的距离）的位置；
（分束器放置时光应沿着其外壳上标注的方向传输；且不要将其放置在离物镜太近的地方，否则将没有足够的空间来操纵傅里叶平面。）
- 用 SM1EC2B 塑料盖遮挡面向用户的分束器侧端口（下左图）。



12. 观察傅里叶面

- 将 LED 调至最大亮度；使用观察屏或纸找到物镜后面的傅里叶面（上右图；物镜的后焦平面；此时，Aperture Iris 关闭，Filed Iris 打开）。

13. Projection Lens 和观察屏安装

- 将 Projection lens ($f = 75 \text{ mm}$) 直接放置在分束器后面（与朝向相机的光路成 90° 度），然后将其固定在面包板上；
- 将观察屏放置在分束器的后面（与朝向相机的光路成 90° 度），前后移动找到可以看到傅里叶平面清晰图像的距离；如果无法在观察屏上看到清晰的傅里叶面，可以调节分束器和 Projection lens 之间的距离；
- **分束器、Projection lens 和观察屏幕放置的一般注意事项：**当观察屏移得更远时，傅里叶面图像会变大。但是，Projection lens 必须更靠近分束器才能获得清晰的图像。如果分束器和 Projection lens 之间没有足够的空间将其移近，可以将分束器和 Projection lens 都移近物镜，但要确保物镜和分束器之间有足够的空间来操纵傅里叶平面。



14. Target Plane Correction

当 Target 未垂直于光路放置时，其玻璃基座上会出现反射，这些反射可能会在傅里叶图像中显示为附加点（反射可能显示在傅里叶平面（玻璃中的双重反射）和反射到 Aperture iris 的光中）。

- 观察 Aperture iris 朝向 Target 的一侧，当 Target 与光束不垂直时，就会产生类似下图中的反射：

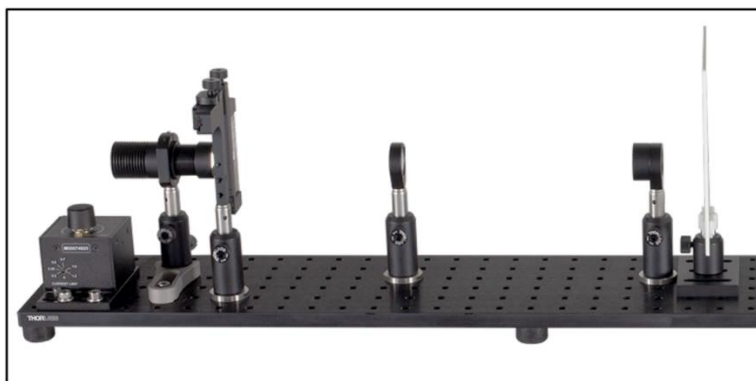


- 如果这些反射偏离中心，可以整体旋转安装 Target 的接杆，直到反光对准 Aperture iris 中心；此过程中可能还需要微调物镜来获得清晰的成像；

三. 实验内容

实验 1: 开普勒望远镜 (Filed lens+ Condenser lens)

- 将 Filed lens ($f = 150 \text{ mm}$) , Condenser lens ($f = 50 \text{ mm}$) 依次放在准直 LED 的前面, 使其焦平面重合;
- 将 Target 放在 Filed lens 的 LED 侧焦平面中 (以便至少照亮一个图案); 然后将观察屏放在 Condenser lens 的后焦平面上观察图像。



实验 2: 开普勒望远镜 (Condenser lens+ Objective lens)

- 将物镜 ($f = 30 \text{ mm}$) 放在 Condenser lens ($f = 50 \text{ mm}$) 后面, 使其焦平面重合;
- 将 Target 放在 Condenser lens 的 LED 侧焦平面上, 然后将观察屏放在 O 物镜的后焦平面上观察图像。

。



实验 3: Projection lens 成像（对应傅立叶面）

- 在实验 2 的基础上将 Projection lens ($f = 75 \text{ mm}$) 放置在物镜 ($f = 30 \text{ mm}$) 后焦距处；
- 将观察屏放在 Projection lens 后面，在任意位置的屏幕上可以看到物镜相机侧焦平面的清晰图像（在傅里叶设置中，这将对应对傅立叶面成像）：



实验 4: 观察傅里叶面（观察屏上）

- 调整 Target 找到晶格（例如：第一行 F2 图案， $g = 15 \text{ }\mu\text{m}$, $b = 6 \text{ }\mu\text{m}$ 晶格）图案的位置，在相机上看到晶格图像的同时可以在观察屏上看到该晶格图案的清晰的傅里叶图像；



实验 5: Field Iris 和 Aperture Iris 在光路中的作用

- 分别打开和关闭光路中的 Field Iris 和 Aperture Iris，同时观察它们在光路中对相机成像、傅里叶面和物体照明的影响（总结如下）；

Effect	Action	
	Opening the Field Iris	Opening the Aperture Iris
Effects on the Camera Image	Enlarges the visible area in the camera image. If the visible area is as large as or larger than the camera chip, opening the field iris has no further influence on the camera image.	Increases the brightness in the camera image.
Effects on the Illumination of the Target	Enlarges the illuminated area on the target.	Increases the brightness on the target.
Effects on the Fourier Image	Causes larger areas of the structures on the target to be illuminated. This increases the brightness in the Fourier image.	The extent of the intensity maxima in the Fourier image changes because the aperture iris is displayed in the Fourier plane by the Keplerian telescope consisting of the condenser lens and objective lens.

实验 6：直接观察 Objective lens 后的傅里叶面

- 在 Target 中选择一个点阵图案进行成像；用一张纸或观察屏找到物镜后的傅里叶面（观察时可以尝试分别打开或者关闭 Field Iris 和 Aperture Iris 来调节观察到的傅里叶面的强度）。

实验 7：Projection lens 成像

- 在 Target 中选择 9 个房屋图案进行成像，把观察屏直接放在 Projection lens 的后面，然后慢慢移开；
- 在将观察屏慢慢移开的过程中会先看到房屋的清晰的成像图案，然后慢慢模糊，最后看到房屋图案的傅里叶面。

实验 8：光学滤波

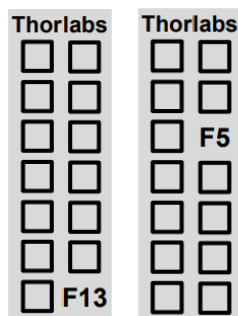
- 观察滤去傅里叶面上的不同衍射级次后对最终成像结果的影响。
- 在 Target 上选择一个特征的图案使其在相机上清晰成像；
- 将下方的狭缝（可 360° 旋转）和 Mask 放置在物镜的后焦平面上进行滤波（可以根据成像的图案的傅里叶面衍射情况选择使用哪种装置进行滤波）；

- 同时观察滤波之后相机上特征图案的变化（对应手册 P72-P92 的内容）。



实验 9：巴比内原理

- 巴比内原理：除零阶外，互补结构的衍射图案是相同的。
- 分别在 Target 上选择 F13 和 F5 特征图案使其在相机上清晰成像；
- 使用放置在物镜后焦平面的 Mask 遮挡傅里叶面上的零阶衍射级次，同时在相机上观察被滤波之后的图像变化。

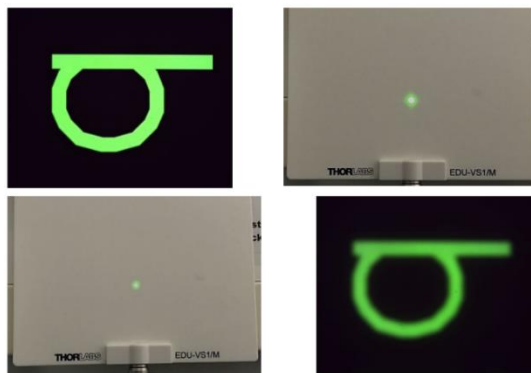


实验 9：图像编辑

柔焦

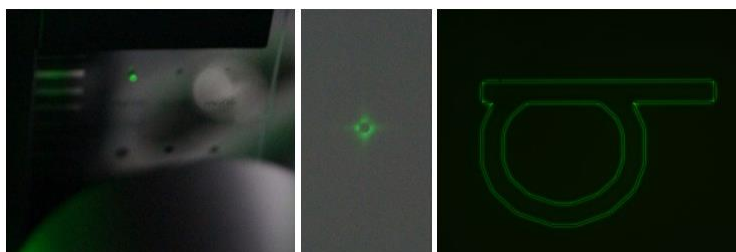
- 图像中对应粗糙结构的低空间频率占主导地位。

- 在 Target 上选择一个特征图案使其在相机上清晰成像；在傅里叶面位置放置 ID12/M 光阑，闭合 Aperture iris；
- 逐渐闭合 ID12/M 光阑，使得傅里叶面上的高级次被阻挡，只留下低阶级次；观察相机和观察屏上的傅里叶面图像的变化。



暗场成像—图案

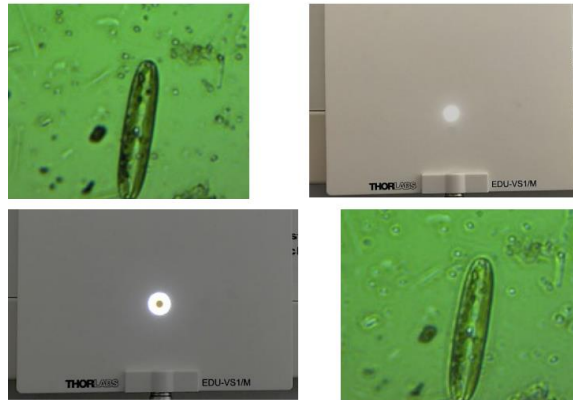
- 图像中对应精细结构的高空间频率占主导地位；精细的结构更容易辨认。
- 仍使用上面进行柔焦操作中的特征图案，但移除 ID12/M 光阑；
- 将 Mask 放置在傅里叶面的位置，并找到一个合适大小的零级掩膜来遮挡零级衍射；观察相机和观察屏上的傅里叶面图像的变化。



暗场成像—生物样品

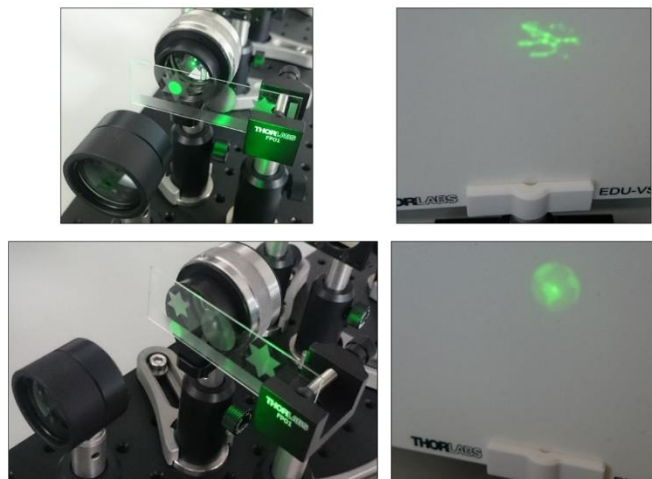
- 图像中对应精细结构的高空间频率占主导地位；精细的结构更容易辨认（适合透明标本）。

- 将硅藻样品放在物平面位置并使其在相机上清晰图像；在 Mask 上选择合适大小零级掩膜遮挡傅里叶面上的零级衍射；调节 Aperture iris 和 LED 的亮度来获得更好的成像效果。



实验 10: Inverse Fourier Target

- 将 Inverse Fourier Target (DOE 元件) 放在物平面上(安装在 FP01 板支架上)；观察傅里叶平面上的图像。



实验 11: 衍射极限分辨率

- 此部分主要证明只有当至少第一个衍射阶数仍然通过成像镜头时，成像才有可能。
- 移除需要成像的 Target 后的所有光学元件（物镜 分束器，套筒透镜和相机）。

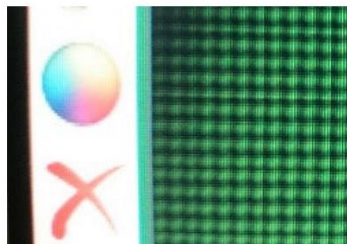
- 调整 Target 的位置，对其最小的点阵 (F1)。由于特征结构很小，很少能够看到一个清晰的矩形图像。相反，会经常看到圆形边缘的黑点。
- 将 Filed iris 闭合至 1/3 左右。现在将先前指定为 Tube lens 的透镜放置在光束路径中，使衍射阶位于透镜支架的边缘（如下图）。



- 移动到下一个最大的晶格 (F2)，使其第一个衍射级通过透镜。
- 使用相机找到产生晶格清晰图像的平面。可能需要把相机从面包板拿下来；为了获得清晰的图像，可以使用较大的晶格结构，如房屋 (F10，相机曝光时间设置为“自动”)。



- 相机上的最终图像看起来应该近似于下边的图像。可能需要调整 LED 亮度或曝光时间以获得合适的图像。



- 现在移回最小的晶格。一阶衍射级次未通过透镜，在相机上再也看不出任何结构。这是阿贝衍射极限的基础：只有当设置允许一阶衍射级次通过时才能生成图像。如果物体是如此之小，以至于光被衍射超出了透镜的边缘，传统显微镜不再可能产生一个图像。