



DH-DO-F

（反射式）多功能数字光学实验系统

**实
验
指
导
书**

杭州大华仪器制造有限公司

友情提示

激光危害：人眼暴露在激光下会受到伤害，激光对用户眼睛的伤害取决于激光的波长和输出功率大小：可见光和红外大部分光（700~1400nm）能够透过瞳孔聚焦于视网膜，视网膜损伤出现在黄斑中心位置，导致视力严重受损，同时对视网膜、视神经和眼睛的中心部分造成不可逆转的伤害。

激光防护：

- 不可直视激光束和它的反向光束，不允许对激光器件做任何目视准直操作。
- 搭建实验平台时，在激光发射口高度会有一个“工作平面”，在激光工作中请勿将头部接近这个工作平面，因为透镜及反射镜组反射、透射的光可能会入眼造成伤害。
- 请勿使激光发射口及反射镜上扬，易导致向上发射的激光入眼造成伤害。

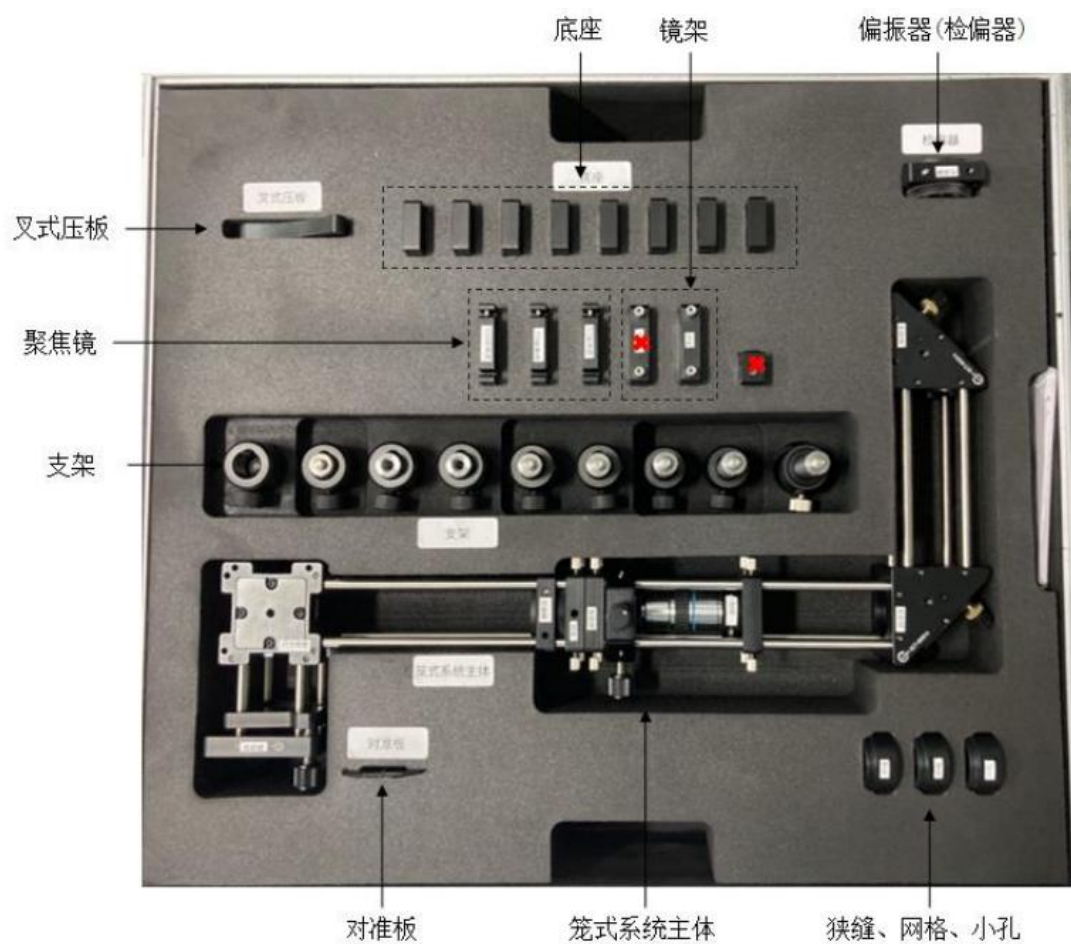
光学镜片使用注意事项：

- 勿用手指直接接触光学镜片表面，以免影响成像质量。
- 轻拿轻放，以免损伤光学镜片。
- 如镜片表面有灰尘，可用洗耳球将灰尘吹落。
- 光学镜片表面如果出现污迹，可用擦镜纸蘸酒精或丙酮擦洗。
- 请勿将光学镜片重叠堆放在一起。

目录

配置清单	3
引言	7
1 空间光调制器	8
1.1 基本结构及参数	8
1.2 液晶的电光效应	9
1.3 琼斯矩阵	10
1.4 振幅调制与相位调制	11
1.5 空间光调制器的使用	12
2 光路的搭建及调节方法	15
2.1 光路搭建	15
2.2 激光器的调节	15
2.3 光路准直	16
2.4 针孔滤波扩束	18
2.5 分光棱镜	19
2.6 空间光调制器 (SLM) 的安装	19
3 CCD 的使用	20
4 功率计的使用	24
5 振幅调制	25
实验 1 波长测量	25
实验 2 振幅调制	28
实验 3 空间光调制器对偏振态的调制	31
实验 4 实时图像变换	35
实验 5 Talbot 像	37
实验 6 阿贝-波特实验	40
实验 7 空间滤波实验	44
实验 8 成像与投影实验	47
实验 9 衍射	50
实验 10 双缝干涉	55
实验 11 双缝干涉法研究SLM的相位调制量	57
6 相位调制	60
实验 12 迈克耳逊干涉	60
实验 13 计算全息再现	63
实验 14 菲涅尔波带片	65

实验 15	光束变换	68
实验 16	平面波与其他波形的干涉	72
7	拓展实验	74
实验 17	像素大小的测量	74
实验 18	移相式数字全息	77



引言

通常我们把能将信息加载于一维或二维的光学数据场上，以便有效的利用光的固有速度、并行性和互连能力的一类器件称为空间光调制器（SLM, spatial light modulator）。空间光调制器可在随时间变化的电驱动信号或其他信号的控制下，改变空间上光分布的振幅、强度、相位、偏振态。空间光调制器一般按照读出光的读出方式不同，可以分为反射式和透射式；而按照输入控制信号的方式不同又可分为光寻址(OA-SLM)和电寻址(EA-SLM)。空间光调制器在现代光学领域中具有越来越重要的地位和价值，它是光学、光电混合系统进行光互连、光学相关、光计算、模式识别、光学控制、光学检测、图象处理、显示技术等中的基本构件和关键器件。

本实验系统以 SLM 为核心器件，搭配一些光学元件，设计完成了 16 项光学实验。实验涵盖波动光学、信息光学、傅里叶光学等方面，且操作简单，实时、快捷。这些实验不仅有助于学生熟悉 SLM 的原理及操作，对学生夯实光学理论基础也有很大帮助。学生也可根据自己的需要和兴趣自行设计实验。本实验指导书分七章内容，第 1 章主要介绍 SLM 及其使用，第 2 章介绍光路的搭建及调节方法，第 3 章介绍 CCD 的使用、第 4 章介绍功率计的使用，第 5 章是利用 SLM 的振幅调制特性实现的实验，第 6 章是利用 SLM 的相位调制特性实现的实验，第 7 章是拓展实验。

1 空间光调制器

空间光调制器可以实现对光波空间分布的调制，它可以将信息加载到光学数据场上，这个数据场可以是一维的，也可以是二维的。同时，它能够有效的利用光波的光互连能力、并行性及固有速度，使其在光学信息处理、光计算等系统中成为一种最基本的构造单元或者重要的器件。空间光调制器含有许多独立的单元，每个独立的单元均可以通过电信号或者光信号进行控制，进而改变光学特性（反射率、透射率及折射率等），实现对经过它的光束进行调制。它主要通过液晶来作为光调制的材料，由于液晶材料的特殊光电效应，在外加电场的作用下，使得液晶分子的排列分布、位置、形状等都会发生改变，使得液晶的物理性质发生改变，最直观的就是光学性质发生改变。

空间光调制器能对光波的相位、振幅、偏振态等参量的空间分布进行变换或调制，因此，可以将空间光调制器看作一个滤光片，这个滤光片是通过写入信号来控制光波复振幅透过率的，即可以将光的相关信息通过写入信号输送到空间光调制器相对应的位置，来调整空间光调制器光透过率的过程。利用空间光调制器对光分布振幅或强度、相位、偏振态以及波长的调制作用，或者可以把非相干光转化成相干光，实现对干涉、衍射、全息再现等多种光学现象的演示。空间光调制器含有许多独立单元，它们在空间上排列成一维或二维阵列。每个单元都可以独立地接受光学信号或电学信号的控制，并按此信号来改变液晶分子的取向结构，利用各种物理效应（泡克尔斯效应、克尔效应、声光效应、磁光效应、半导体的自电光效应、光折变效应等）改变自身的光学特性，从而对照明在其上的光波进行调制。

1.1 基本结构及参数

反射式相位型空间光调制器的结构如图1-1所示。上下两个极板之间充有向列液晶层，透明的取向模紧贴着液晶层的上下内表面，作用是使得液晶分子的取向平行于取向模表面。最上层覆盖透明玻璃，透明玻璃的内表面涂有透明导电层，最下层是硅基板，上面刻蚀有可独立寻址电极，电极上面镀有高反射率铝膜。

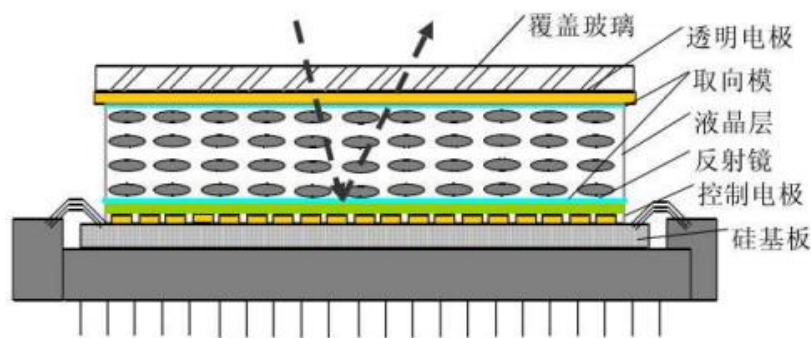


图1-1反射式空间光调制器结构示意图

液晶层由许多液晶晶胞组成，这些晶胞在空间上呈一维或二维分布，每个晶胞独立接受电信号的控制。图1-2是用CCD拍得的空间光调制器中的液晶结构，液晶结构类似于一个正交光栅。

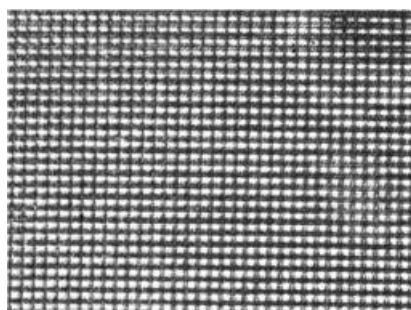


图1-2液晶结构

1.2 液晶的电光效应

晶体的电光效应是在探讨当光通过受电场影响的晶体时所发生的变化。对于某些晶体来说，施加电场会改变折射率椭球的方向进而改变折射率大小。以图1-4垂直取向的液晶排列方式为例，在未施加电场前，液晶的折射率椭球是垂直站立的。入射光由下方射入，此时所得到光偏振面与折射率椭球的横切面为一个圆，因此可得到的 $n_o = n_e$ 。即无论用什么方向的偏振态入射，液晶只是各项同性的介质不改变其偏振态。当施加电场后，液晶分子受电场的影响会慢慢的旋转倾斜，所得的横切面则会变成椭圆，即 $n_e > n_o$ 。 n_e 随着电场的增强而变大，极大值会发生在折射率椭球旋转九十度，当液晶分子受电场影响而旋转时，不同偏振方向的光会得到不同的折射率，不同的折射率造成不同的光程及相位差，相位差则可造成光的偏振态改变，在应用上通常会在液晶的前后加上起偏器与检偏器(Polarizer & Analyzer)来把空间光调制器调整成振幅调制器或是相位调制器。

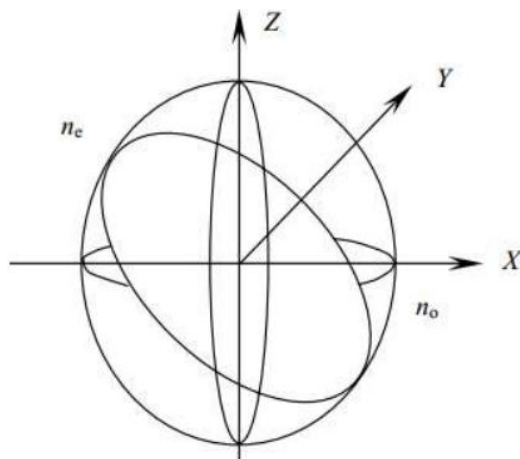


图1-3液晶折射率椭球

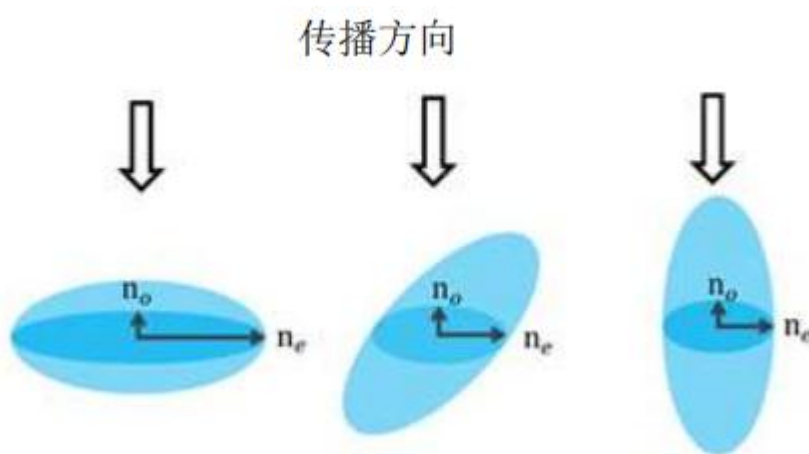


图1-4折射率椭球受电场影响而改变其折射率

1.3 琼斯矩阵

琼斯矩阵（JonesMatrix）是由R. C. Jones在1940年所提出，是一个在处理光的偏振态的问题上相当强大的工具。它将光的偏振态以一个 2×1 的矩阵来表示，而各种光学元件皆以 2×2 的矩阵表示，光通过各种元件的结果即为这些矩阵相乘。最后所得到的 2×1 矩阵就是光通过光学元件后的最终状态（偏振方向、振幅大小、相位变化）。

琼斯矩阵以 2×1 的矩阵来表示光的偏振态，如下式所示

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

其中， E_x 、 E_y 为复数，实部表示振幅强度，虚部表示相位。当光学元件或晶体快慢轴以光轴为轴偏转 ϕ 时，为简化计算可利用线性代数旋转矩阵的方法来改变原先入射光的坐标轴 x - y 至新的坐标轴 u - v ，如图1-5所示，可用公式表示为：

$$\begin{bmatrix} E_u \\ E_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = R(\phi) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

其中，为旋转矩阵为旋转后新坐标轴所表示的入射光偏振态。

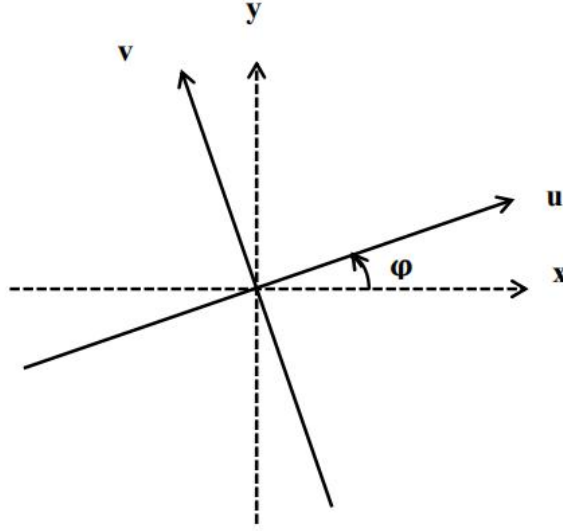


图1-5旋转坐标轴

假设有一个单轴晶体其折射率分别为 n_e 及 n_o ，其中 n_e 为顺着u轴的折射率， n_o 为顺着v轴的折射率，当光通过此晶体时新的偏振态为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp\left(-jn_e \frac{\omega}{c} l\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-jn_o \frac{\omega}{c} l\right) \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

写成以 x-y 轴的形式可变成

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = R(-\varphi) \begin{bmatrix} \exp\left(-jn_e \frac{\omega}{c} l\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-jn_o \frac{\omega}{c} l\right) \end{bmatrix} R(\varphi) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

其中， ω 为频率、 c 为光速、 l 为晶体厚度。当给液晶施加电场，液晶的折射率椭球会改变方向， n_e 也会随之改变，这会产生光程差的变化并且也会造成相位的改变，而且不同的入射偏振角也会造成许多不同的变化

1.4 振幅调制与相位调制

如图1-6所示，在x-y平面上，x轴与y轴分别对应非寻常光轴与寻常光轴，其折射率分别为 n_e 及 n_o ，起偏器与x轴的夹角为 β ，起偏器与检偏器的夹角为 χ ，并将入射光强度归一化，因此入射光通过起偏器、空间光调制器、检偏器后的偏振态可以写成

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(\beta - \chi) & \sin(\beta - \chi)\cos(\beta - \chi) \\ \sin(\beta - \chi)\cos(\beta - \chi) & \sin^2(\beta - \chi) \end{bmatrix}^*$$

$$\begin{bmatrix} \exp\left(-jn_e \frac{w}{c} l\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-jn_o \frac{w}{c} l\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta \\ \sin\beta \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

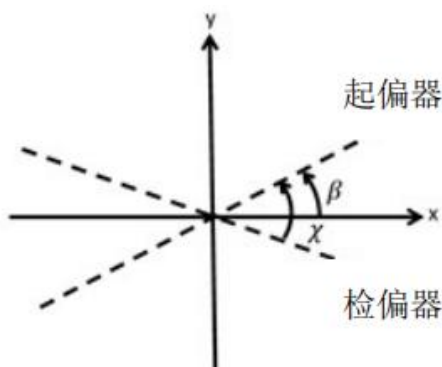


图1-6起偏器、检偏器与x轴的相对角度

穿透率T为

$$T = \cos^2 \chi - \sin 2(\beta - \chi) \sin(2\beta) \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} l(n_e - n_o) \right] \quad (1-6)$$

当起偏器与x轴夹角为45° ($\beta = 45^\circ$)、与检偏器夹角为90° ($\chi = 90^\circ$) 时穿透率为

$$T_A = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} l(n_e - n_o) \right] \quad (1-7)$$

随着供给电压的不同（灰度不同）， n_e 随之变化，由上式可知穿透率 T_A 会随着 n_e 呈二次正弦函数变化，此时空间光调制器工作在振幅调制模式。

当起偏器与x轴、检偏器的夹角均为0°时，穿透率T为1，单入射光的偏振方向与非寻常光轴相同，存在可电控的相位延迟

$$\phi = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} l n_e\right) \quad (1-8)$$

此时，空间光调制器工作在相位调制模式。

1.5 空间光调制器的使用

型号	FSLM-2K70-VIS
调制类型	相位型
液晶类型	反射式
灰度等级	8 位，256 阶
像素数	1920×1080

像元大小	8.0μm
有效区域	0.69" 15.36mm×8.64mm
相位范围	2π532nm
填充因子	>87%
开口率	/
光利用率	75%±5%
刷新频率	60Hz
光谱范围	420nm-700nm
损伤阈值	2W/cm ²
数据接口	DVI
配向角方向	与液晶光阀长边相同

表 1-1 产品技术指标

- 1) 启动计算机。
- 2) 按下图所示连接各部件，打开电源开关。

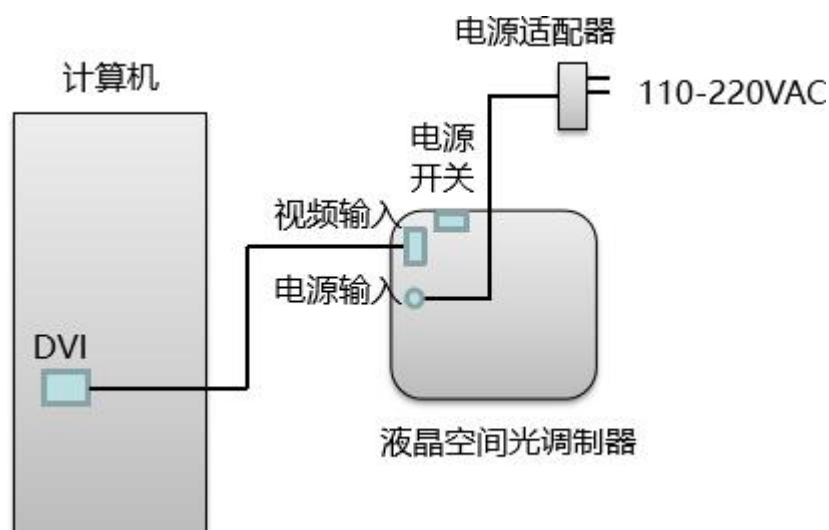


图 1-7 各部件连接示意图

注意：空间光调制器的电源为专用电源，切勿与其他电源混用，损坏调制器。

3) 以 Windows 系统为例，在桌面右击，点击“屏幕分辨率”，识别当前显示器，单击另一个显示器，将屏幕分辨率设置为 1920×1080，将“多显示器”中设置为“拓展这些显示”，点击“应用”，然后点击“确定”，此时完成将桌面图像扩展到第二个显示器的设置。

4) 检验：在空间光调制器液晶光阀表面放置偏振片，使得偏振片的标识线与液晶光阀长边平行（或垂直），打开教学系统（MOES）软件，选择 1920*1080 分辨率，选择振幅调制菜单下的菲涅尔波带片（或不用打开软件，直接将其他对比度高，容易观察的图案设置为桌面背景），旋转偏振片，观察液晶光阀中显示的图像是否正常，确保计算机桌面的图片顺利扩展到第二个显示器上，如图像不正常，检查接线。

5) 给空间光调制器加载图片的方式有两种。第一种：设置为桌面。方法为右击桌面，单击“个性化”，点击下方“桌面背景”，找到所需的图像单击，根据需要设置“图片位置”，一般建议设置为“平铺”。也可直接找到所需扩展的图像，单击右键，单击“设置为桌面背景”（建议使用分辨率与 SLM 分辨率相同的图片）。

6) 第二种用我公司开发的 MOES 控制软件实现对扩展到空间光调制器上图像的控制。

7) 根据相位调制和振幅调制的需求调整起偏器和检偏器的角度。

注意：请勿私自拆机，以免影响调制器的工作状态以及后期维修事宜；切勿用手触摸液晶面板，如有灰尘，可用气皮球轻轻吹去。

2 光路的搭建及调节方法

多功能数字光学实验系统的主体光路如图所示，由激光器发出的光经过两块反射镜反射进入显微物镜，显微物镜与准直器组合成一个开普勒式扩束镜，中间的小孔对聚焦的光斑起滤波作用。扩束后的光斑经过偏振器，在分光棱镜处分为两路，一路经过反射镜反射，另一路经过调制器调制后反射，如不需要反射镜那一路光，可用对准板将其挡住。

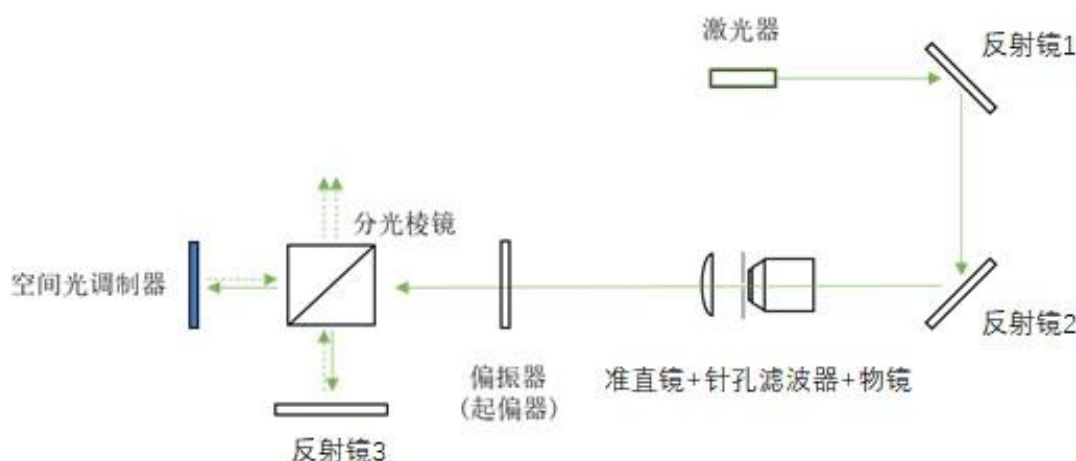


图 2-1 笼式系统主体光路图

2.1 光路搭建

用反射镜支架和笼式立方支架将笼式系统主体搭在光学平台或面包板上；

系统高度的确定：建议将反射镜支架接杆统一放置在最低，以此确定整个系统的高度（约12cm）；用刻度尺测量反射镜的高度，调节笼式立方支架的接杆，使得笼式立方和反射镜等高。

2.2 激光器的调节

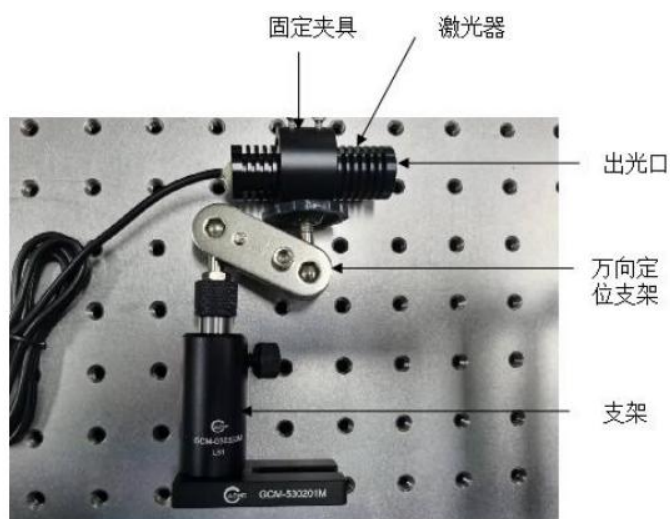


图 2-2 激光器定位支架连接

用激光器固定夹具固定紧激光器，万向支架连接夹具和支杆以便调节激光器的俯仰。将对准板放置在两个反射镜之间的笼杆上，微调激光器的俯仰和偏摆，使得光斑打在对准板的中心，固定激光器。



图 2-3 激光器调节光路示意图

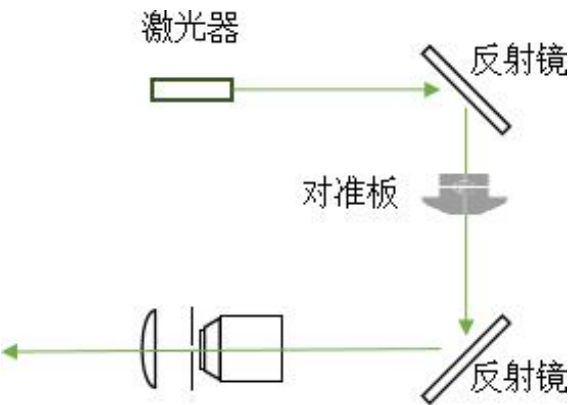


图 2-4 激光器调节光路

2.3 光路准直

- 1) 将对准板移至显微物镜前(位置 1)处，调节反射镜 1，使光斑打在对准板中心：

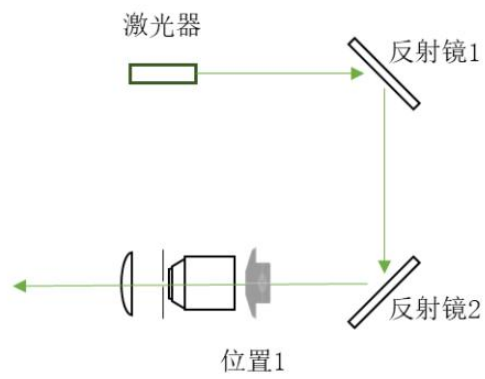


图 2-5 光路近端调节示意图

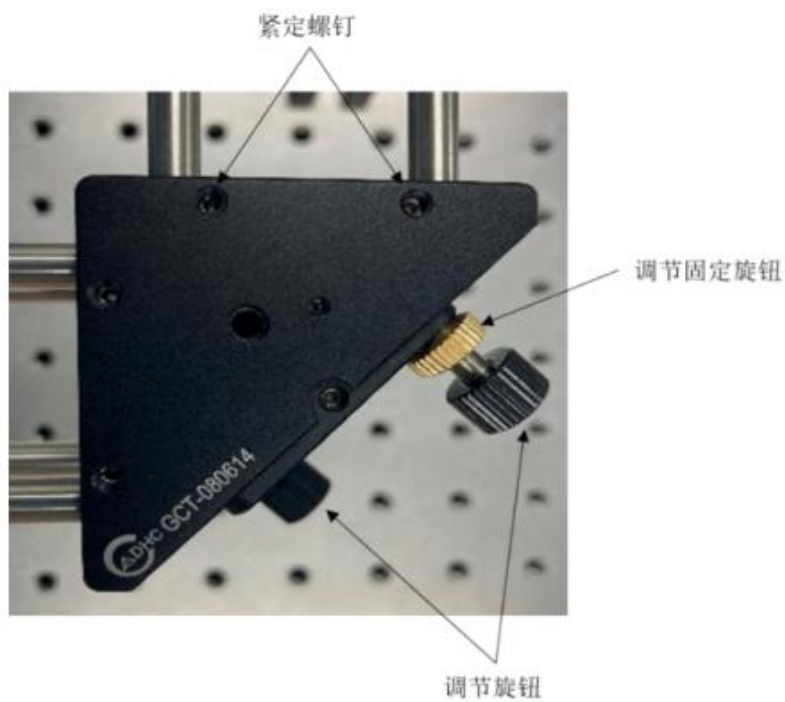


图 2-6 反射镜调节

2) 松下针孔架、准直镜、镜架、起偏器的紧定顶丝，将准直镜和小孔移至远端(位置 2) 调节反射镜 2 使发散的光斑打在对准板中心：

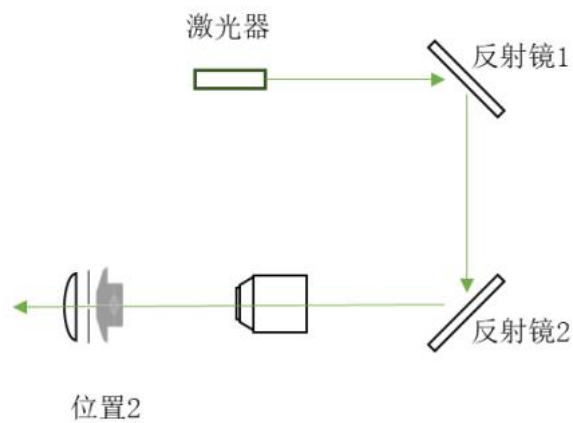


图 2-7 光路远端调节示意图

3)重复多次 1 和 2 步骤直至在位置 1、2 处光斑都位于对准板中心。

2.4 针孔滤波扩束

将光路通过对准板准直后，利用针孔滤波，滤波的目的是提升光斑质量。具体方法是： 将针孔架移动靠近显微物镜，使针孔处于物镜焦平面处，对准板接收经过针孔后的光斑，微调小孔 X-Y 位置，使光斑始终保持在中心。直至光斑均匀无衍射环、无杂光。锁紧针孔架的紧定螺钉，在锁紧过程中针孔会移动，此时需一边调节针孔 X-Y 位置找到光斑，一边锁紧。

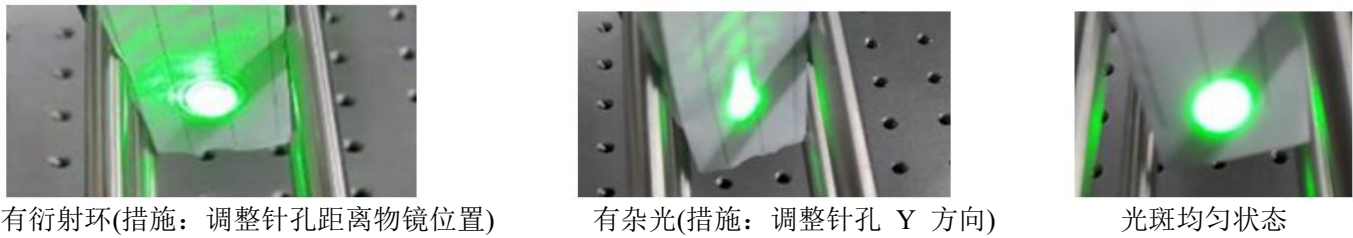


图 2-8 针孔滤波器的调节

针孔滤波调节完毕后，移动准直镜，靠近针孔（距离约为 50.8mm），使经过准直的光斑在近端(准直镜后)和远端(分光棱镜后)大小一致，此时完成扩束准直。

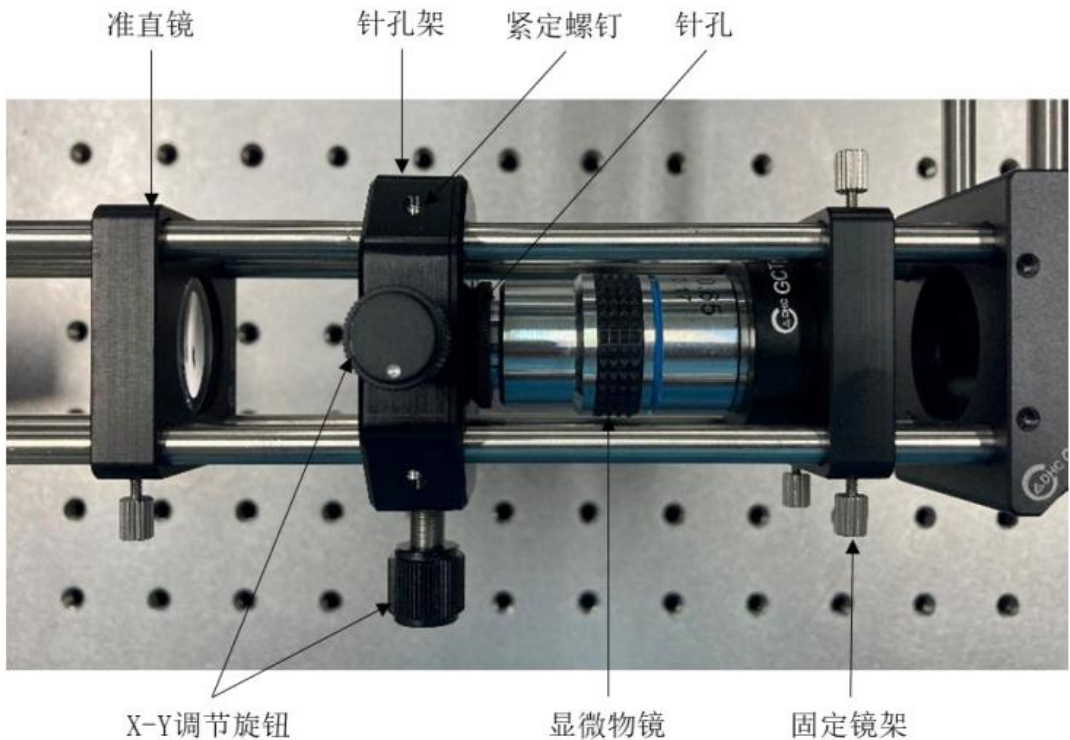


图 2-9 扩束组成

2.5 分光棱镜

经过扩束准直的光通过预留的镜架和偏振器(起偏器)后，被分光棱镜分为两束：一束入射至反射镜后射出；另一路透过分光棱镜，照在空间光调制器上被调制后射出。改变偏振器(起偏器)的偏振角度可以改变空间光调制器的调制状态，使其进行振幅调制或者相位调制。实验过程中如不需要反射镜一路的光，可以用对准板将其挡住(如图所示)。

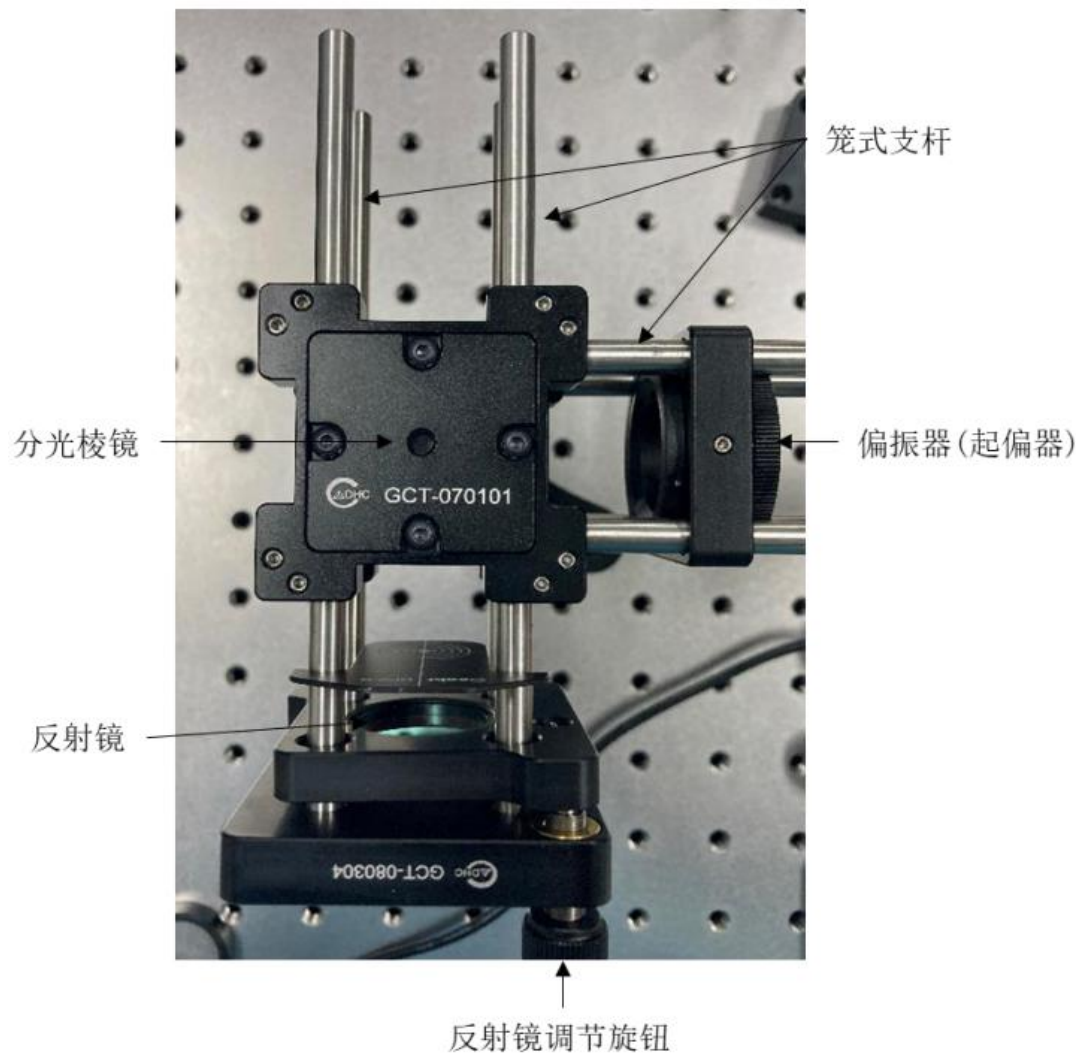


图 2-10 分光棱镜

2.6 空间光调制器 (SLM) 的安装

用调制器支架连接调制器（水平放置），如图位置放置空间光调制器，调制器距离笼式立方的距离与反射镜距离笼式立方的距离保持一致；安装 4 根 100mm 的笼杆，在笼杆末端放置对准板，用挡光片挡掉反射镜 3 反射的光，调整空间光调制器的偏摆，使得调制器反射的光正好处于对准板中心，固定空间光调制器。连接调制器电源线和视频线。

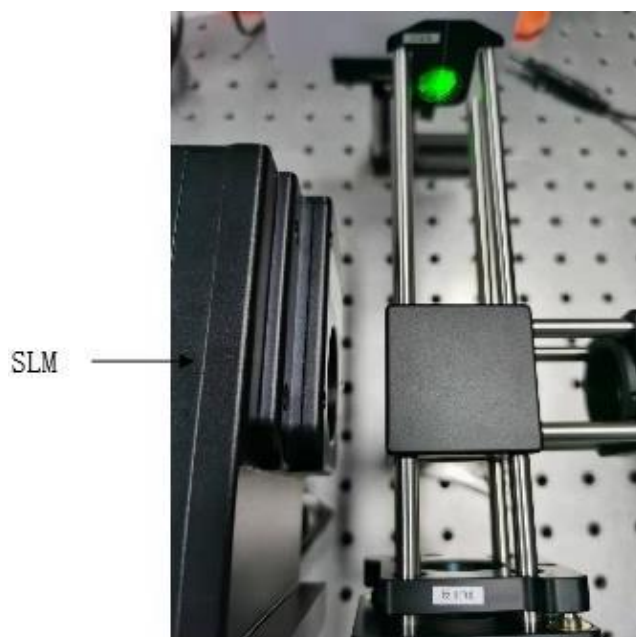


图 2-11 SLM 的固定

3 CCD 的使用

- 软件安装：点击安装 MindVision Camera platform Setup (2.1.9.16) 安装包；具体的安装步骤可以参考《彩色 CCD 安装使用说明书》。
- 接线：USB2.0 工业相机数据线一端连接 CCD，一端连接电脑。如有需要可加 CCD 镜头。
- CCD 感光面距离：CCD 感光面与外界有一段距离，计算时应量感光面至物面的距离。

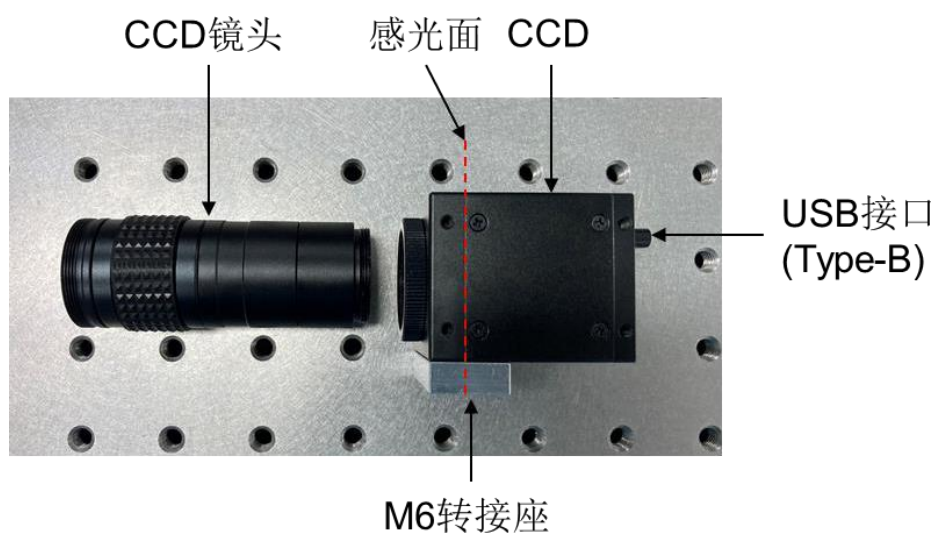


图 3-1 CCD 的连接

说明：不建议不加镜头使用，以免损坏 CCD。

◆ 加镜头后像面

实验2 振幅调制

【实验目的】

- (1) 学会寻找空间光调制器的配向角。
- (2) 掌握SLM实现振幅调制的原理。
- (3) 通过旋转起偏器与检偏器将空间光调制器调节成振幅型。

【实验原理】

通过旋转起偏器与检偏器可以将空间光调制器调节为振幅和相位调制两种状态。根据空间光调制器的穿透率可知

$$T = \cos^2 \alpha - \sin 2(\beta - \alpha) \sin(2\beta) \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} l(n_e - n_o) \right] \quad (5-5)$$

其中， α 为起偏器与检偏器的夹角， β 为起偏器与配向角的夹角， l 为两倍LCOS液晶层的厚度。当起偏器与检偏器的夹角 α 为 0° 时，空间光调制器穿透率为

$$T_p = 1 - \sin^2(2\beta) \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} l(n_e - n_o) \right] \quad (5-6)$$

穿透率会随着偏振器的旋转而改变，而在起偏器与配向角同方向或垂直，即 $\beta=0^\circ$ 或 $\beta=90^\circ$ 时有最大的振幅透过率，此角度刚好分别于非寻常光轴和寻常光轴顺向，其中后者不会因电压改变折射率，所以我们可以输入不同的图案然后转动起偏器，衍射光与零阶的反射光比最

大时即为 $\beta=0^\circ$ ，而衍射光消失时就是 $\beta=90^\circ$ ，依此特性来寻找空间光调制器的配向角。

找出空间光调制器的配向角之后，接下来使偏振器与配向角夹角为 45° 、与检偏器夹角为 90° 可以得到

$$T_A = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} l(n_e - n_o) \right] \quad (5-7)$$

穿透率以正弦平方的形式变化造成不同的灰阶效果，此时调制器工作在振幅调制模式。

实验光路如图5-3所示，寻找配向角时只放起偏器，不放检偏器。

起偏器角度固定，旋转检偏器，验证马吕斯定律，即 $I = I_0 \cos^2 \theta$ ，其中 θ 为检偏器旋转角度。

【实验装置】

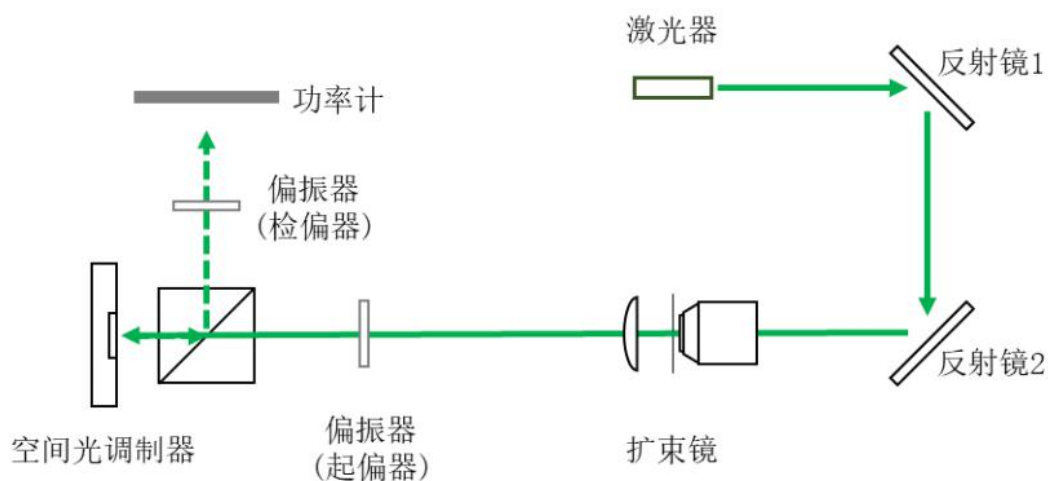


图5-3 振幅调制（一）光路图

- 1) 激光器
- 2) 笼式系统主体
- 3) 起偏器
- 4) 分光棱镜
- 5) 空间光调制器
- 6) 检偏器
- 7) 功率计
- 8) 观察屏

【实验步骤】

- 1) 按图 5-3 所示搭建光路，用对准板挡去反射镜 3 那路光。
- 2) 第一步是寻找配向角。SLM 启动，打开 MS MOES 软件，在左上角选择适配分辨率 1920×1080，选择相位调制菜单下的迈克尔逊干涉实验，用观察屏观察经 SLM 反射的光斑；灰度 1 设置为 128，灰度 2 设置为 0，（此时反射光斑中间有一条清晰的分界线），旋转起偏器，直到中间分界线看不清楚，此时调节软件中的灰度 1 和灰度 2 会发现观察屏上光斑的左右两部分亮度都不变化，此时记录起偏器的角度即为配向角 0（配向角大约在 90 度附近）。
- 3) 接下来光路中加入检偏器，注意检偏器的方向，零刻度线在上方，光从可旋转面出射，将起偏器角度旋转为配向角减去 45°，检偏器角度旋转为配向角加上 45°，此时空间光调制器处于振幅调制状态。
- 4) 软件中选择振幅调制菜单下的振幅调制实验，改变灰度值，在观察屏上观察光斑，找到最暗光斑对应的灰度值，微调起偏器和检偏器角度使得出射光最暗，记录起偏器和检

偏器的角度（此时调制器工作在振幅模式，起偏器和检偏器角度可在其他振幅型实验中直接用）。

5) 在检偏器后方固定功率计探头，调节高度使得光斑正好打在功率计探头的中心。灰度值每隔 30 改变一次，用光功率计测量出射光的功率变化（值稳定后再读数），并记录，绘制功率随灰度值的变化曲线。

6) 在输出功率最大值和最小值对应的灰度值附近微调灰度值（因采集间隔是灰度 30，所以需要进一步寻找最大最小值对应的灰度），寻找最大光强和最小光强对应的灰度值（可在其他振幅型实验中直接用）并记录。

7) 将灰度值设置为最大光强对应的灰度，然后检偏器每隔 20 改变一次，用光功率计测量出射光的功率变化并记录，绘制功率随检偏器旋转角度的变化曲线，验证马吕斯定理。

【数据记录及处理】

表 5-2 振幅调制数据记录与处理

实验名称		2 振幅调制		记录人		记录时间		配向角	
振幅调制时起偏器角度			振幅调制时检偏器角度				光强最大时灰度		光强最小时灰度
灰度值	输出功率/mW	归一化功率	检偏器旋转角度	输出功率/mW	归一化功率	马吕斯 $I = I_0 \cos^2 \theta$	绘制输出功率随旋转角度的变化曲线：		
0			0						
30			20						
60			40						
90			60						
120			80						
150			100						
180			120						
210			140						
240			160						
255			180						