

# 基于电寻址液晶光阀的 光信息综合实验系统

**(一) 实验系统介绍**

**(二) 实验指导书**

浙江大学光电信息工程学系

杭州三花科特光电有限公司

# 目 录

<b>(一) 实验系统介绍 .....</b>	<b>3</b>
一、 实验概况.....	3
二、 实验装置介绍.....	3
三、 软件说明.....	4
3.1 软件安装说明.....	4
3.2 软件使用和操作.....	4
四、 实验注意要点.....	16
五、 实验配置.....	16
六、 实验光路调整.....	16
<b>(二) 实验指导书 .....</b>	<b>18</b>
实验一 液晶的电光效应实验.....	18
实验二 用衍射理论测量电寻址液晶光阀的微结构.....	27
实验三 光的干涉和衍射实验.....	29
实验四 计算全息光学实验.....	36
实验五 全息图衍射效率的测量实验.....	41
实验六 傅立叶变换性质及全息性质的验证 .....	45

# (一) 实验系统介绍

## 一、 实验概况

基于电寻址液晶光阀的光信息综合实验系统是利用液晶对光的调制特性而发展出来的一套适用于大学本科生及研究生的物理实验系统,用于光电信息工程专业、物理专业及相关专业的光学基础实验教学。其特点是实验内容新颖、技术先进,有软件辅助实验,操作方便。

液晶是一种介于液体和晶体之间的有机高分子化合物,既有液体的流动性,又有晶体的取向特性,当液晶分子有序排列时会表现出光学各向异性。液晶屏就是利用液晶对光的调制特性而制作的空间光调制器。由于这种调制器是电寻址的,便于通过计算机来控制信号的输入和输出,也能用于光学信息处理,如计算全息等。

本实验系统便于学生从实验现象中更形象地认识信息光学中广泛使用的空间光调制器,即液晶光阀的工作原理,加深对全息尤其是计算全息基本概念和基本性质的理解,为今后更深入的学习奠定基础。

## 二、 实验装置介绍

本实验装置主要由高分辨率电寻址透射式液晶光阀、激光变换系统、CCD显示系统和光强探测系统等构成。该液晶光阀的显示内容是直接由计算机控制,可以实时地进行图像处理且方便实验操作。实验系统的具体结构如图1所示。

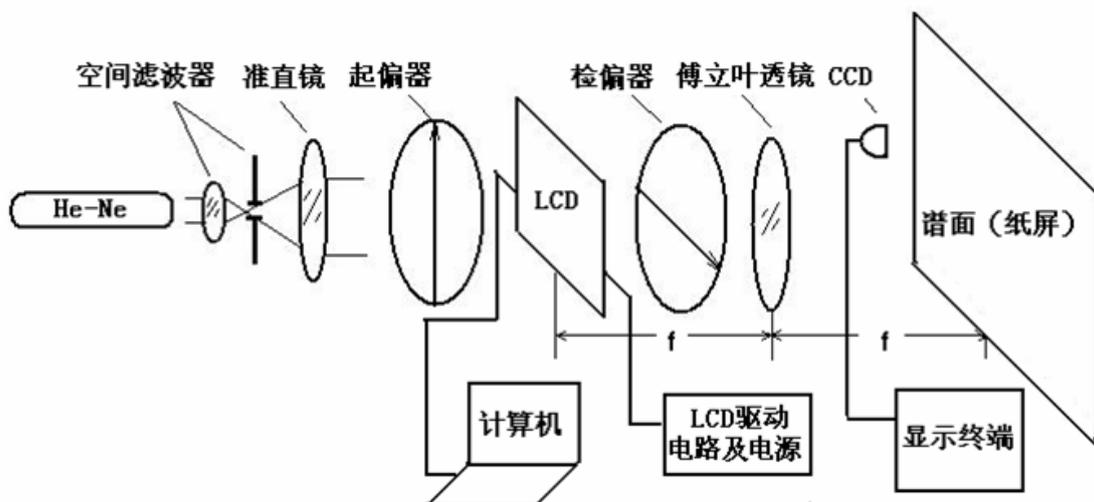


图1 实验系统装置示意图

其中采用 He-Ne 激光器 (632.8nm); 空间滤波器由 20 倍的扩束显微物镜和大小为 20 $\mu$ m 的针孔组成; 准直透镜焦距是 300mm; LCD 液晶屏对角线尺寸是 0.9 英寸, 分辨率是 1024\*768, 刷新频率是 60Hz; 傅立叶透镜焦距是 300mm。

激光器发出的激光束通过扩束、小孔滤波和准直镜准直后得到平行光。平行光经过液晶光阀调制，并发生衍射。透过液晶光阀后的衍射光线经傅立叶透镜变换后在傅立叶透镜的焦面上得到频谱。最后由 CCD 采集图像并输出到相应的显示器上。

在进行液晶的电光效应测试时，终端显示将 CCD 显示系统换成光强探测系统来测定透过液晶光阀的光强。

### 三、 软件说明

基于液晶屏的物理学实验系统配套软件是基于 WINDOWS 操作系统的应用软件。它能辅助本系统各个实验的操作，便于实验现象的实现和处理。

#### 3.1 软件安装说明

- a. 插入光盘，运行安装执行文件 setup.exe，屏幕上将出现准备安装画面。等待进入下一步：欢迎窗口。
- b. 在欢迎窗口中，单击 Next 按钮进入下一步。如果要放弃安装，单击 Cancel 按钮。
- c. 软件许可协议窗口，只有选择 I accept the terms of the license agreement，Next 按钮才能处于激活状态，继续下一步安装过程；否则将中止安装进程。如果选择 Back 按钮，将返回欢迎窗口。
- d. 在用户信息窗口，输入你的姓名、单位和产品序列号。只有输入正确的序列号后才能进入下一步安装进程。序列号在光盘中的 SN 文件中可以找到。
- e. 在选择安装位置窗口，默认的安装目录为“C:\ProgramFiles\Zhejiang University\Computer generated hologram”，你也可以按自己的需要更改安装目录。选择完毕后单击 Next 按钮进入下一步。
- f. 在安装状态窗口，进度条显示满 100%后进入安装完毕窗口。
- g. 在安装完毕窗口，单击 Finish 按钮后，安装完毕。

#### 3.2 软件使用和操作

##### 3.2.1 图像基本操作

##### 图像文件显示

- a. 打开程序。
- b. 打开要显示的图像文件。

在“文件”菜单上单击“打开”菜单项，或单击工具栏里的打开图标弹出“打开”对话框。在对话框里选择要显示的图像文件（位图文件或 JPEG 文件），然后单击按钮打开或回车确定。注意显示的图像格式要求为(\*.bmp, \*.dib, \*.jpg, \*.jpe, \*.jpeg),否则会显示成全黑。

- c. 重复步骤 b，打开所有要显示的图像文件。每次新打开的图像文件都会显示在新的子窗口中。如下图所示：



- d. 在“查看”菜单上单击“全屏”菜单项，或在工具栏上单击全屏图标将全屏显示当前窗口中显示的图像。如图所示



### 图像编辑和处理

对显示在当前子窗口的图像进行各项处理。

图像镜像：工具栏里的镜像图标和分别实现图像的水平镜像和垂直镜像。

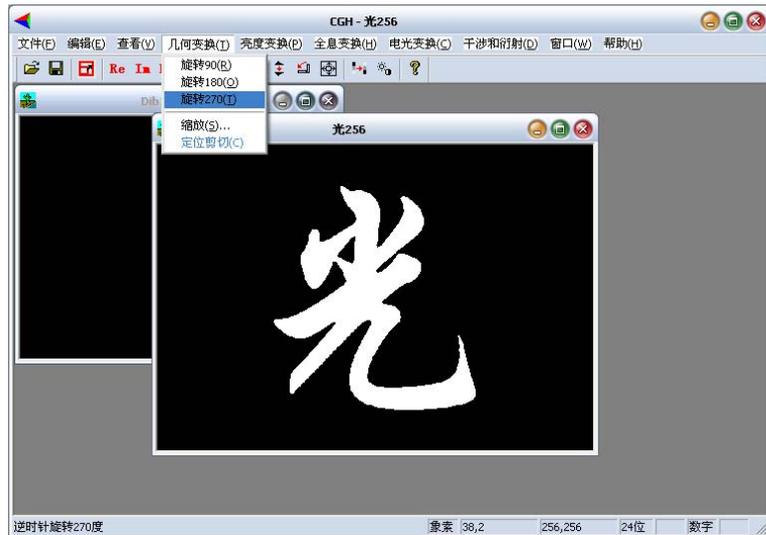


水平镜像

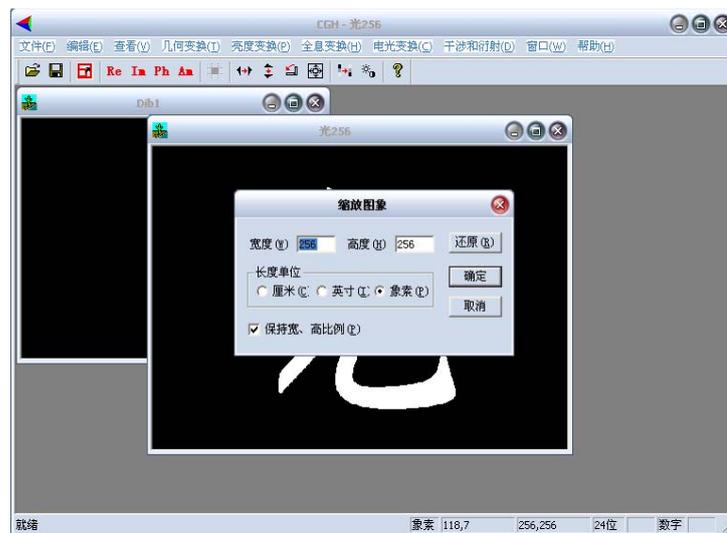


垂直镜像

旋转图像：几何变换菜单中**旋转 90**、**旋转 180** 和**旋转 270** 菜单项会分别旋转图像 90、180 和 270 度。或工具栏里的旋转图标来实现旋转图像，每次旋转图像 90 度。如下图示：



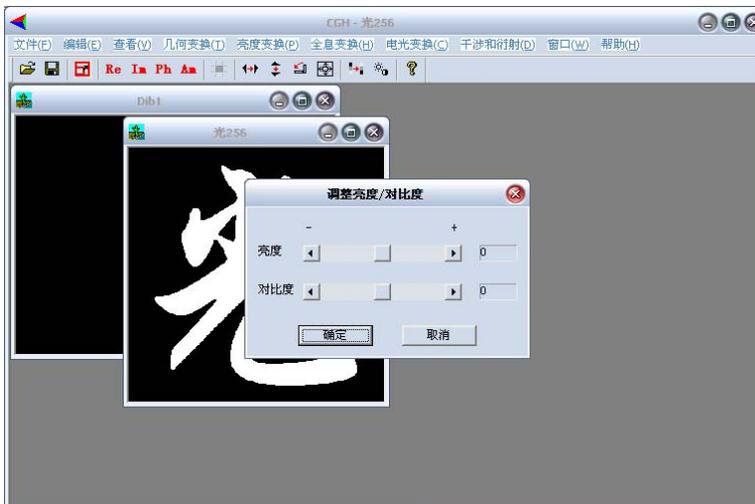
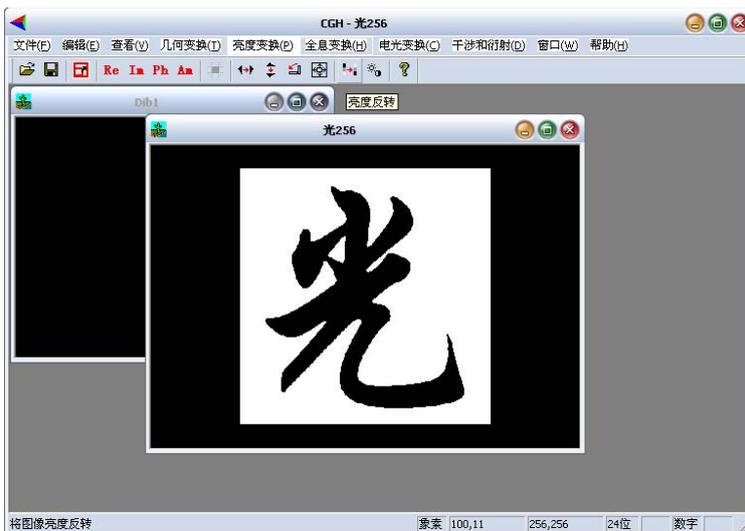
缩放图像：几何变换菜单中缩放菜单项打开缩放图像对话框，在对话框里在宽度和高度编辑框里输入图像改变后的数值，在长度单位中选择单位厘米、英寸和像素，按确定按钮来确认。或通过工具栏里的缩放图标来改变图像的大小。如下图示：



剪切、复制、粘贴图像：按住鼠标左键并移动，选定相应的区域。编辑菜单中的菜单项剪切、复制和粘贴分别实现对选定区域的相应动作。如下图示：



亮度处理：利用**亮度变换**菜单中的菜单项来实现图像的亮度反转和亮度/对比度调整。通过工具栏里的亮度反转图标来实现图像灰度反转，通过亮度/对比度调整图标来打开相应的对话框。如下图示：

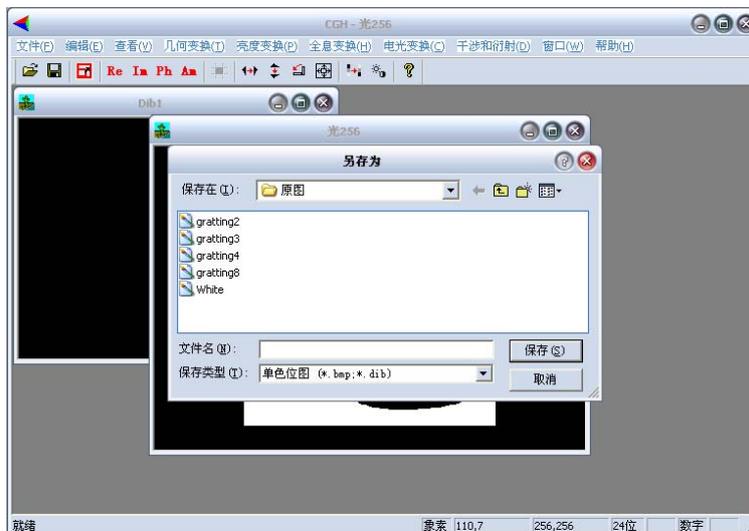


## 图像保存

要保存当前窗口显示的经过处理或变换的图像，并替换原来的图像文件，选择文件菜单中的**保存**菜单项或工具栏里的保存图标实现保存。如下图所示：



如果要保留原来的图像文件，选择文件菜单中的**另存为**菜单项，打开“另存为”对话框，输入图像文件名，要注意保存图像的格式。



### 3.2.2 全息图的产生和全息图的模拟再现

在当前窗口中显示一幅原图，将可以进行计算该图像的傅里叶变换全息图。注意要计算的图像最好是由简单线条构成的高亮度小区域的图像。

在“全息变换”菜单上单击“全息变换实部编码”，“全息变换虚部编码”和“全息变换相位编码”菜单项，或在工具栏中的相对应的图标 **Re**、**Im** 和 **Ph**。则在当前子窗口中显示计算得到的相应编码的全息图。

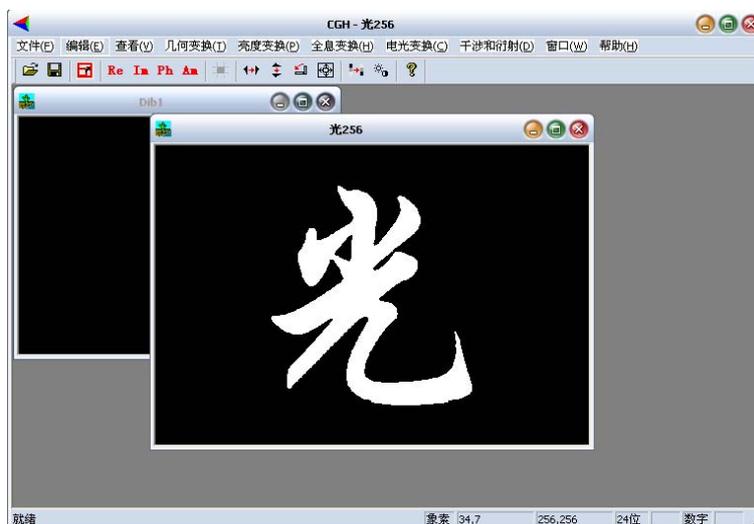
每次点击相应的菜单项或图标都将进行一次变换，而且每次变换的图像是当前窗口中显示的图像，不是对原来的图像文件进行变换。如果要对原来的图像进行操作，则需要先关闭该窗口，再显示原来的图像文件。

生成的 Re、Im 或 Ph 全息图，选择强度编码（即按全息变换强度编码菜单项或 **Am** 图标）则模拟再现，显示该全息图的原来图像。

对全息图的图像处理操作见图像基本操作。

操作示例如下：

- a. 显示原始图像，即在液晶光阀上显示“光”。如下图所示：



- b. 选择全息变换实部编码，产生全息图

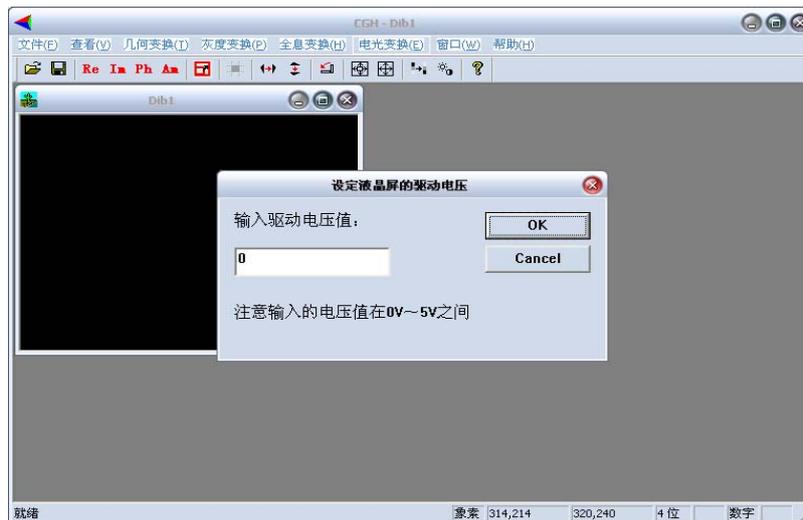


- c. 模拟再现



### 3.2.3 液晶的电光效应的测量

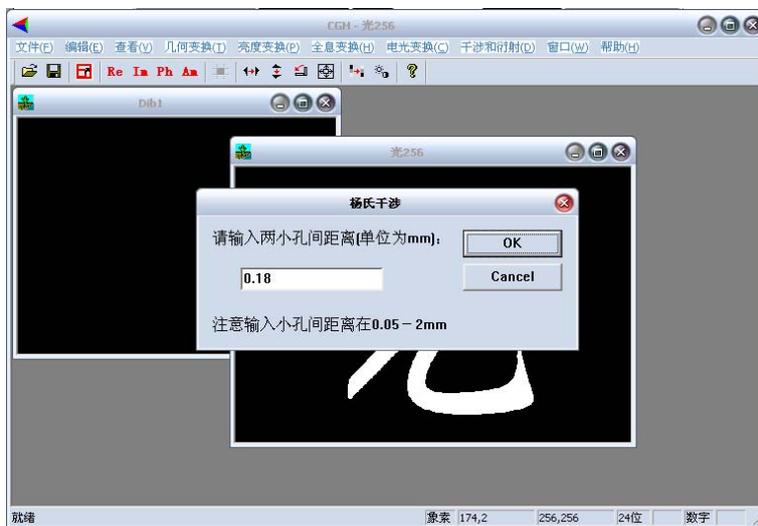
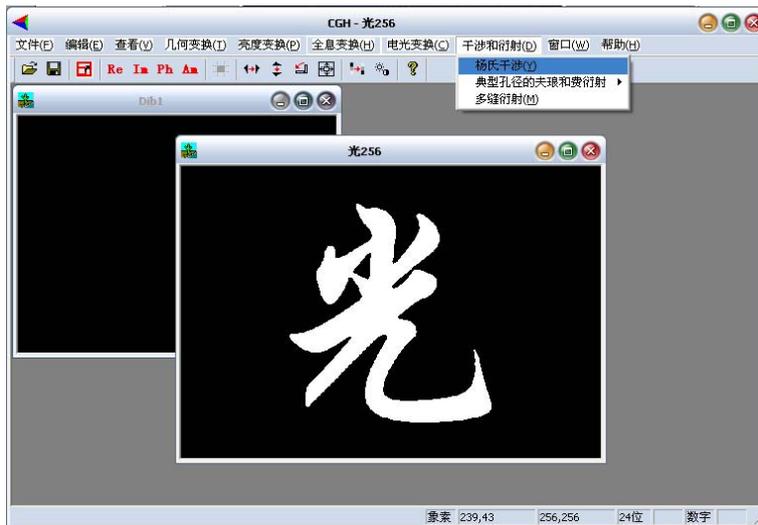
- a. 单击“电光变换”菜单项，弹出“液晶光阀驱动电压的设定”对话框。



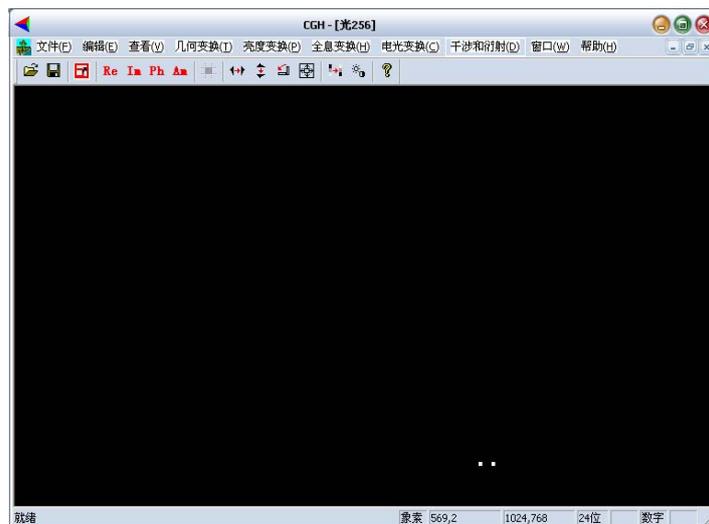
- b. 在该对话框中输入要测量的电压值，并确定。如上图所示：
- c. 全屏显示。
- d. 用光强探测系统测得透射的光强强度。
- e. 重复步骤 a 到 d，改变输入的电压值，测出液晶的电光响应曲线。

### 3.2.4 干涉和衍射

选择干涉和衍射菜单下的杨氏干涉，如下图所示：

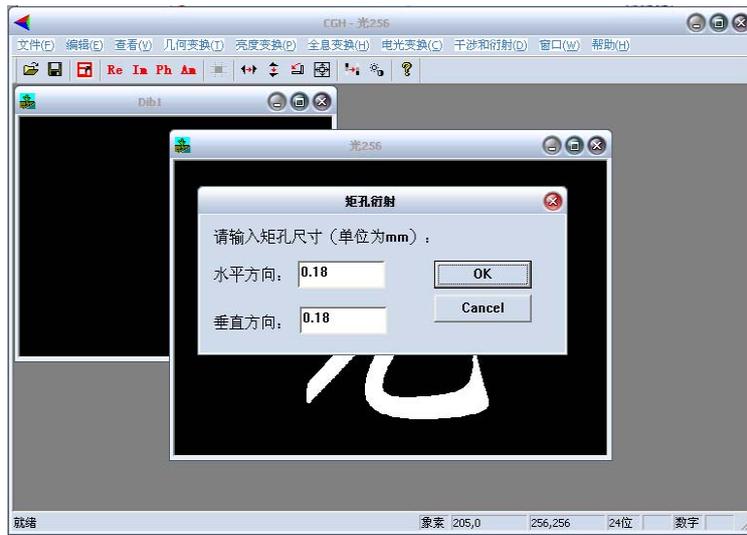


在输入框中输入两小孔距离，即可得到相应的杨氏干涉图样。如选择默认值，须放大得图样如下：

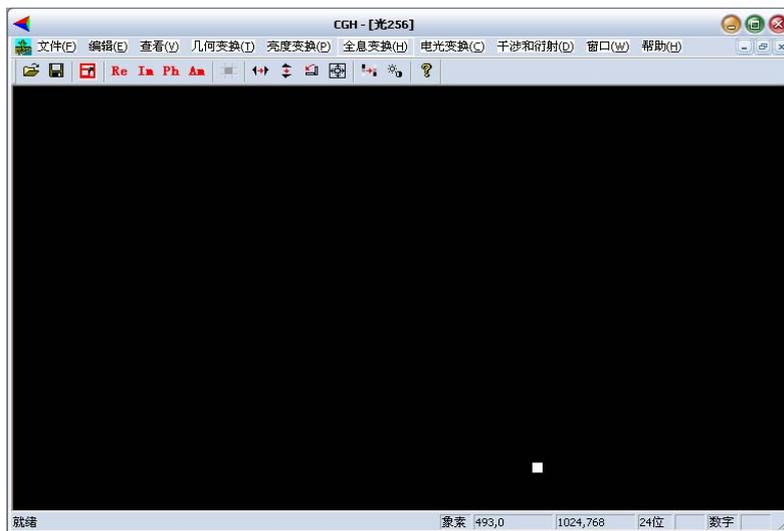


选择干涉和衍射菜单下的典型孔径的夫琅和费衍射—矩孔/单缝/圆孔衍射，如下图，并在相应输入框中输入所需参数，即可得到相应的夫琅和费衍射图样。

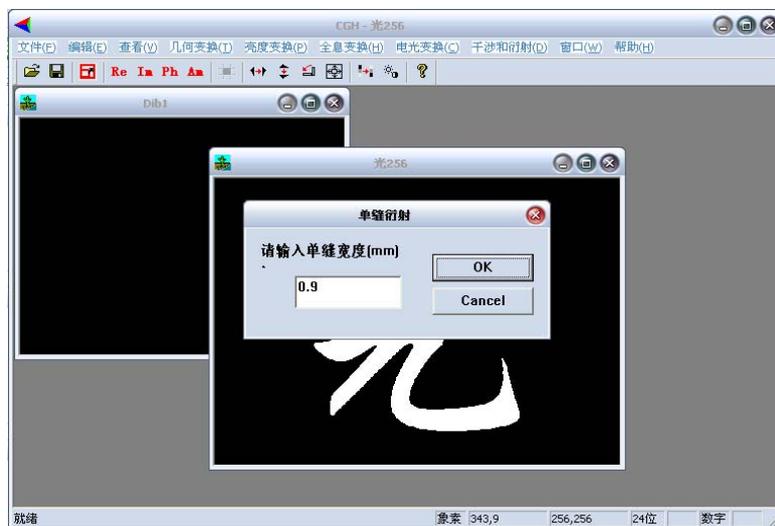
矩孔衍射:



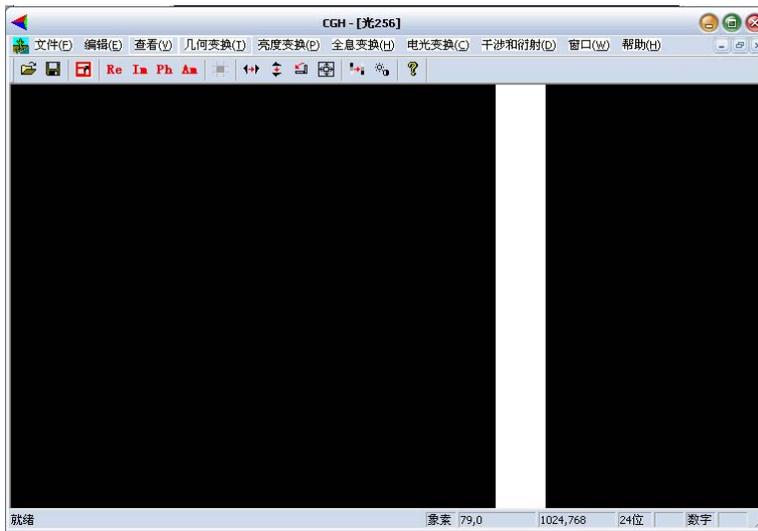
选取默认值得图样如下:



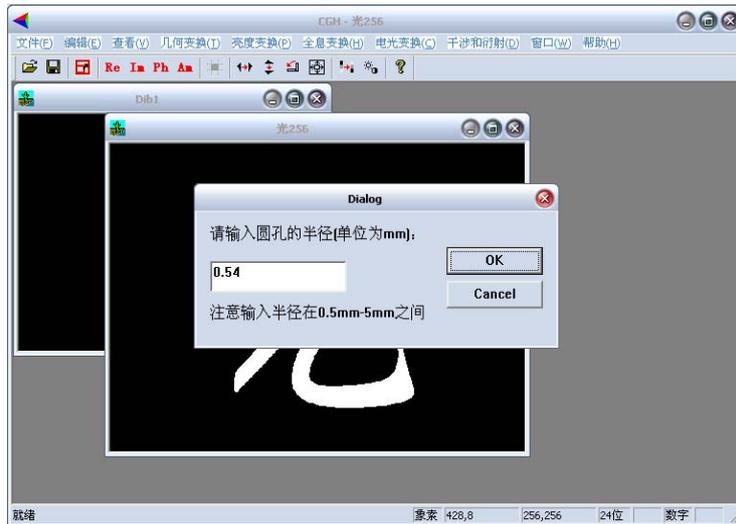
单缝衍射:



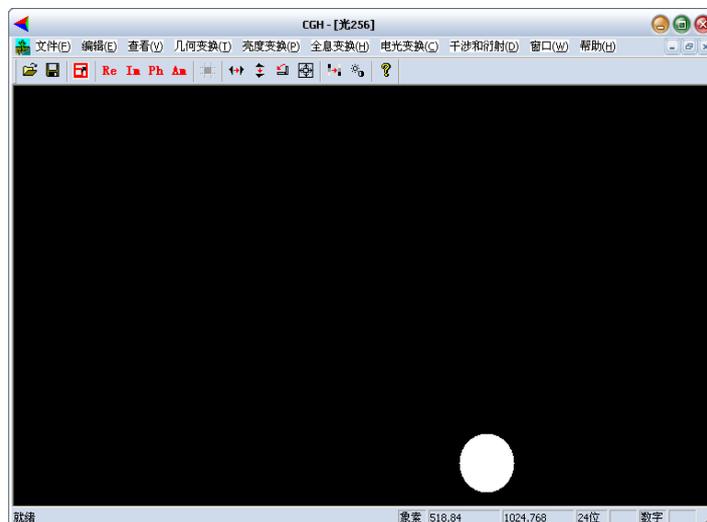
选取默认值得单缝衍射图样如下：



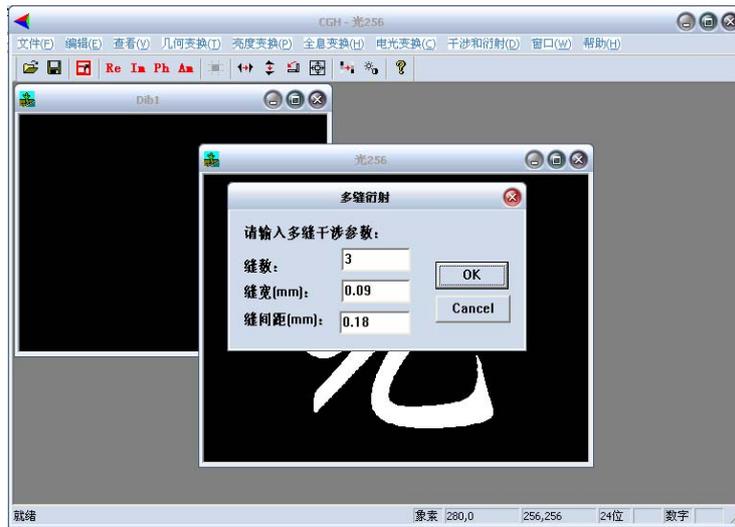
圆孔衍射：



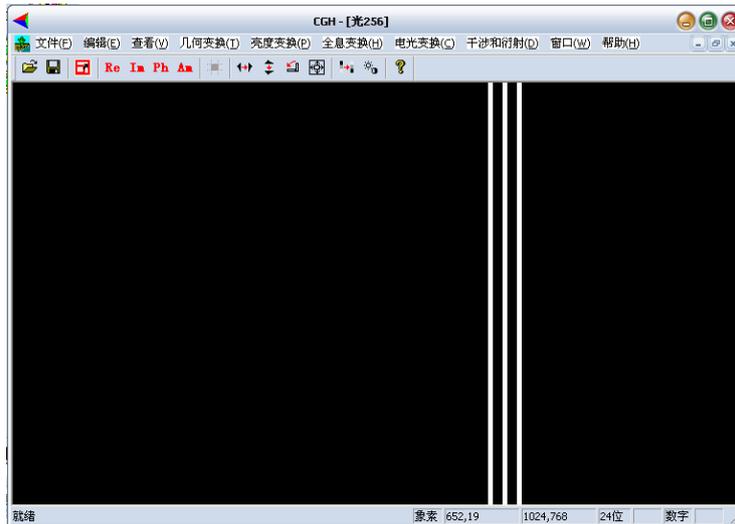
选取默认值，得图样如下：



选择干涉和衍射菜单下的多缝衍射，如下图：



设置参数后可得多缝衍射图样。如选择默认值，得图样如下：



## 四、 实验注意要点

1. 本实验系统共提供六个实验，可根据各专业的实验教学需要来自行选择。
2. 在进行实验前必须仔细阅读实验指导书，清楚实验目的，理解实验原理，并重点熟悉各实验装置、操作方法和注意事项。
3. 必须严格按照实验步骤进行操作，才能顺利完成各个实验。
4. 严禁擅自拆卸实验仪器、设备的各组成部分，若实验中遇到故障应首先报告实验指导老师，由指导老师排除故障或做相应处理。
5. 光学零件或组件的表面应保持清洁，不要用手随意触摸任何光学表面。

## 五、 实验配置

### 1. 主体装置

本实验装置的主体由激光器、液晶显示、光学再现系统、CCD 图像采集与显示、光强探测组成，并配以相应的驱动电路和电源。

### 2. 计算机配置

本套实验系统是与计算机及相应的外围设备配套使用的，实验操作及图像处理均在计算机上进行。计算机主板必须 CPU586 以上，具有 100M 硬盘，内存大于 64M。计算机及其他显示器、打印机等外围设备由用户自己配置，操作软件由本实验系统提供。

## 六、 实验光路调整

光路调整步骤如下：

- 1 打开激光器电源，取下导轨上除了液晶盒以外的所有器件(底座可以保留)，调整激光器的方向及支脚高度使得光束照射液晶光阀像面的中心，同时保持光束与导轨平行。
- 2 将空间光滤波器（小孔部分旋下）插入光路中，固定在如图 1 所示位置上，调整高度和方向使出射光斑照射在 LCD 像面上，此时可以用白色纸板挡光、定位。
- 3 光路中插入准直镜，位置如图 1。保持显微物镜出口位置和准直镜的距离约为 300mm。
- 4 将小孔部分旋到空间光滤波器上，调整水平、左右的旋钮使得光束能射出小孔。此时可以看到除中间亮斑外，边缘出现黑色衍射光圈。调整小孔位置使得光斑对称、均匀。同时调整显微物镜与小孔距离到 1mm 以内，使得透过小孔的光强度最大并均匀照明液晶板。再次调整准直镜位置，使得小孔与准直镜距离为

300mm。

- 5 插入起偏器,由于激光器出射为偏振光,旋转起偏器使出射光达到最强(粗略)。
- 6 连接好液晶盒的电源线、数据线,打开电脑,打开分频器,打开 LCD 驱动电源。设置电脑显示分辨率为  $1024 \times 768$ ,刷新频率为 60Hz。
- 7 运行软件 CGH.exe,全屏显示图片库中 white.bmp 图片。旋转检偏器,用纸板接收并观察,使得出射光强达到最小。
- 8 微调起偏器,然后微调检偏器,如此反复,直到寻找到出射光强最小的位置。
- 9 全屏显示图片 black.bmp,旋转检偏器,再次使得出射光强度最小,此时起偏器、LCD、检偏器构成一个微型显示器。注意保持三者距离尽量近。
- 10 将傅立叶透镜固定到导轨上,调整使其与 LCD 的距离为 300mm。
- 11 将光强探测器的底座固定到导轨上,保证其与傅立叶透镜距离为 300mm。
- 12 光路部分调整结束。

## (二) 实验指导书

### 实验一 液晶的电光效应实验

#### 一、 实验目的

1. 加深对液晶的电光效应的理解。
2. 掌握利用 LCD 液晶光阀的响应曲线进行图像反转和图像边缘增强的工作原理及方法。

#### 二、 实验原理

##### 1. 液晶光阀的工作原理

液晶是一种有机高分子化合物，既有晶体的取向特性，又有液体的流动性。当液晶分子有序排列时表现出光学各向异性：光矢量沿分子长轴方向时具有较大的非常光折射率  $n_e$ ；而垂直分子长轴方向为寻常光折射率  $n_o$ （针对 P 型液晶材料）。把两块玻璃合在一起，中间用一定厚度的间隔层控制玻璃间的距离，再在间隔中充满液晶，便形成一液晶盒。液晶盒玻璃内表面经一定方法处理之后，可以使盒中的液晶分子长轴沿一定方向排列。此时液晶盒和一块用晶体做成的相位器相仿，晶轴方向即为分子长轴方向。若在组成液晶盒的两玻璃间加一定电压，盒里的液晶分子在电场的作用下会沿着电场方向排列，即光轴方向沿着电场方向偏转一个角度  $\theta$ ， $\theta$  是所加电压  $V$  的函数。由此实现了电场控制的双折射效应的变化，沿光传播方向的折射系数  $n_o$  和  $n_e$  发生变化，有关系式

$$1/n_e^2(\theta) = \cos^2(\theta)/n_e^2 + \sin^2(\theta)/n_o^2 \quad (1-1)$$

液晶光阀正是利用此特点制作的器件。

图 1 所示液晶光阀 (LCTV) 是利用液晶混合场效应制成的一种透射式电寻址空间光调制器。它是一个由多层薄膜材料组成的夹层结构。在两片玻璃衬底 1 和 8 的里面是两层氧化物制成的透明电极 2 和 7。低压电源  $E$ （一般取电压值在 0~5V）就接在透明电极上。液晶层 5 的两边是液晶分子取向膜层 3 和 6，两取向层的方向互相垂直，起到液晶分子定向和保护液晶层的作用。液晶层 5 的厚度由衬垫 4 和 9 的间隙决定，一般取  $d < 10 \mu\text{m}$ ，很多情况下  $d$  仅为  $2 \mu\text{m}$ 。

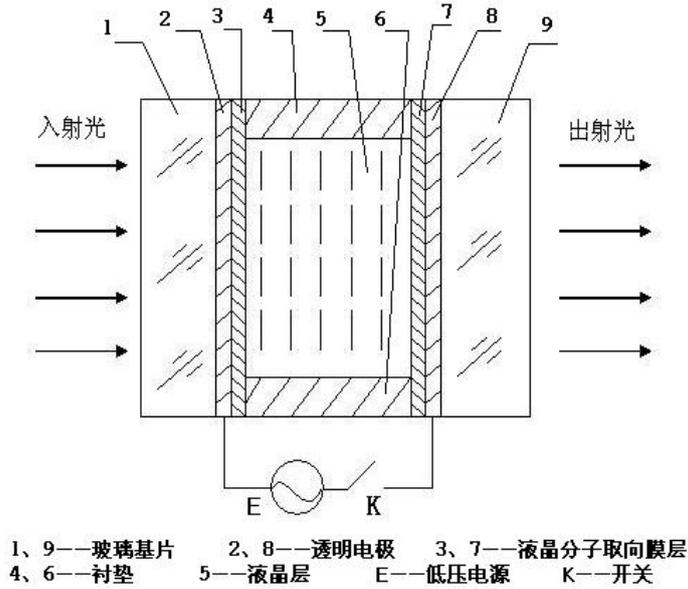


图 1.1 液晶光阀结构示意图

利用  $90^\circ$  扭曲向列型液晶的液晶光阀与起偏器、检偏器一起组成一个空间光调制器 (LC-SLM)，如图 1.2 所示。控制液晶像素电光效应的实际电压值，是由液晶光阀驱动以 60Hz 的频率矩阵式扫描两边的像元电极来决定的。

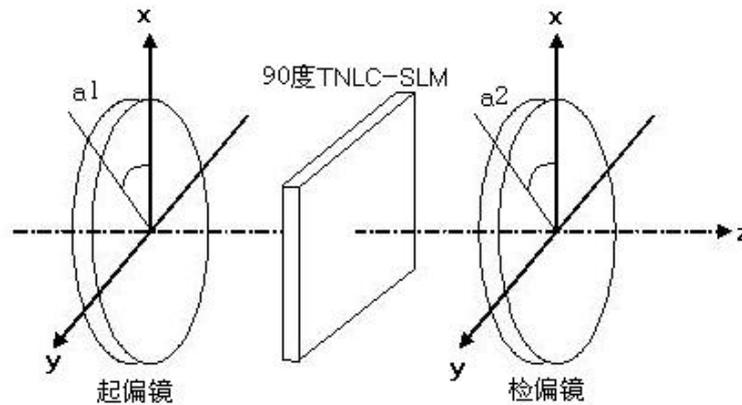


图 1.2 LC-SLM 的结构示意图

起偏器与检偏器的偏振轴与  $x$  轴的夹角分别表示为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ，由琼斯矩阵算法可以得到输出光束的光强透射率的表达式：

$$T = \left[ \left( \frac{\pi}{2r} \right) \sin(r) \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \cos(r) \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\beta}{2r} \right) \sin(r) \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \right]^2 \quad (1-2)$$

其中  $\beta = (\pi d / \lambda)(n_e(\theta) - n_o)$ ， $r = \sqrt{(\pi/2)^2 + \beta^2}$ 。

当  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$  或  $\alpha_1 = 90^\circ$ ,  $\alpha_2 = 0$  时, 有  $T = 1 - (\pi/2r)^2 \sin^2(r)$ 。

当  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$  时, 有  $T = (\pi/2r)^2 \sin^2(r)$ 。

当  $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$  时, 有  $T = \sin^2(r)$ 。

因此改变起偏器和检偏器的偏振轴  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 我们就可以得到不同的电光效应曲线, 即输出光强与所加电压的关系曲线。

当液晶层两边电场为 0 时, 液晶分子取向在两液晶分子取向层表面处都是跟取向层的方向一致, 并且它们的长轴方向相差  $90^\circ$ 。此时, 起偏器的方向跟液晶层的入射面的取向层方向一致。透过起偏器的线偏光, 随着液晶分子取向的偏转, 旋转  $90^\circ$  度, 这叫做旋光效应。若检偏器与起偏器方向垂直, 光线全部透过检偏器, 因此透明 (如图 1.3 中的 a 所示)。若检偏镜平行于起偏镜, 光线被检偏镜阻挡, 此时不透明。

当加上比较大的电压值如 5 伏时, 受所加电场的控制, 液晶分子的倾角发生了变化, 趋向于垂直于液晶光阀表面, 旋光效应消失。此时, 起偏镜的方向跟液晶层的入射面的取向层方向一致, 透过起偏器的线偏光, 透过液晶层不发生旋转。若检偏器方向与起偏器垂直, 光线被检偏镜阻挡, 因此输出光强为最小值 (如图 1.3 中的 c 所示)。若检偏器平行于起偏器, 光线最大程度透过检偏器, 因此输出光强为最大值。

对于加其它的中间电压值的液晶像素, 液晶分子的倾角为中间值, 相应的输出光强也就介于最大值与最小值之间 (如图 1.3 中的 b 所示)。这样输出光束的光强空间分布就按照液晶光阀上的电压值的空间分布被调制。

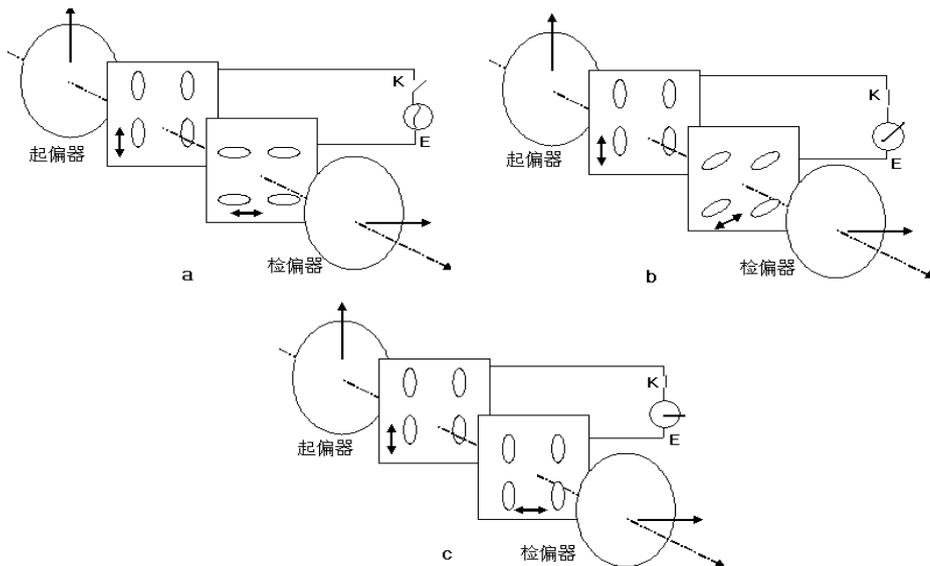


图 1.3 不同电压下的液晶像素状态

改变所加的电压值，得到不同的输出光强，就得到液晶的电光响应曲线，即电压和输出光强的关系曲线。

## 2. 液晶光阀用于图像反转和图像微分的工作原理

根据得到的液晶光阀的输出光强与所加电压的关系曲线，即液晶光阀的电光效应曲线如表 1.1:

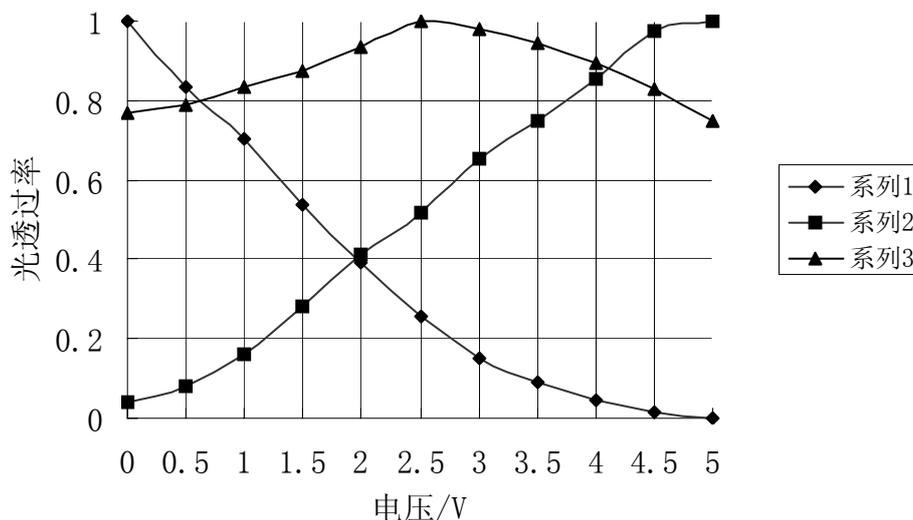


表 1.1 不同  $\theta$  夹角下的典型的电光效应曲线 (x 轴表示电压, 单位 V, y 轴表示光强透过率)

表 1.1 中曲线 1 为检偏器在目前位置, 即  $\theta = 90$  度时电光效应曲线, 可以反映出不同电压下灰度近似线性的变化趋势。如果旋转检偏器改变  $a_2$  的大小, 在某一特定度数下会出现曲线 2 的情形, 曲线 2 跟曲线 1 的强度值正好“相反”, 此时若输入一幅图像, 则必然会观察到: 原来图像的暗处, 在输出图像中变亮了, 而原来图像的亮处, 在输出图像中相应的部分变暗。因此通过调节偏振片的夹角, 可在观察屏上看到原图像的反转图像, 即可以实现图像的灰度翻转。

曲线 3 代表了另一特殊情形, 此时液晶光阀最大透过率发生在某一中间电压值处。若输入一幅图像, 则会观察到原来图像的暗处和亮处都显示为较暗, 而中间灰度级显示为极亮。这时, 图像的轮廓部分被增强了, 这种现象称为边缘增强效应, 即对图像进行了微分操作。

## 三、 实验光路

如图 1.4 所示, He-Ne 激光器提供入射光, LCD 液晶光阀由驱动电路驱动, 并与计算机相连, 光探测器采用硅光电池以探测透过液晶的光强。

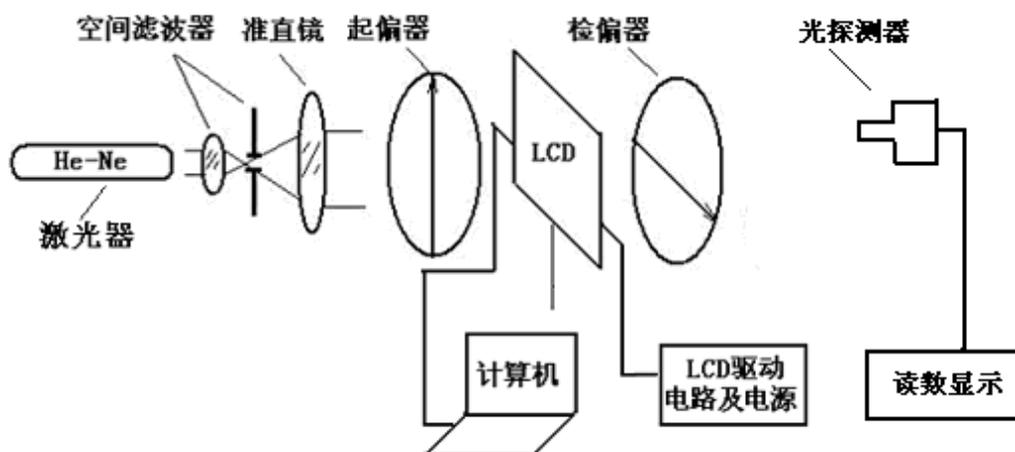


图 1.4 实验装置示意图

#### 四、 实验步骤

1. 按照“光路调整步骤”部分的说明调好光路，如图 1.4。
2. 检查系统是否运行正常，运行软件 CGH.exe，软件操作见软件使用说明。
3. 保持室内环境光较暗。挡掉进入光探测器的激光，读取光探测器读数，此时反应环境光强度，在下面数据处理过程中均需先减去该数值。如果环境足够暗，该读数为 0。
4. 点击程序界面**电光效应**菜单，输入不同的电压值  $V$ ，间隔取 0.5V 或者更小，读取光探测器读数，记录下相应的光强，填入数据记录表格。
5. 记下此时检偏器的角度（上方刻度线所指示刻度盘读数），旋转检偏器，每次转过 15 度（或者更小），记录每次对应检偏器读数，重复步骤 4，测量至少 10 组以上数据。（为了避免测量太多数据，参见步骤 9）
6. 按照表 1.1 的格式分别处理各组数据，利用 excel 软件在同一张图上绘出电光效应曲线。数据处理方法见附录 1。
7. 观察绘制的图表，选取类似于表 1.1 中曲线 2 和 3 的曲线（曲线 2 反应了图像反转，曲线 3 反应了边缘增强），标记为曲线 a 和曲线 b。将检偏器旋转至对应于曲线 a 的角度上，打开图片 white\_black.bmp 可以观察到黑白反转现象；将检偏器旋转至曲线 b 对应角度上，打开图片 black\_gray\_white.bmp，可以观察到中间灰色的部分明显变亮，即实现了边缘增强。
8. 为了找到更精确的图像反转和边缘增强时对应检偏器的位置，可以每次旋过 10 度，或者更小的角度，多测几条曲线。
9. 上述实验步骤可能需要测量较多数据，为了节省时间，可以考虑只测如表 1.1 所示的三条最典型曲线，操作方法为：a、调好光路后，不旋转检偏器，直接测量一组数据。b、全屏显示图片库中的 white.bmp 图，

旋转检偏器使得透过光强最小（注意不可能完全消除），即实现了图像反转，测量此时的电光效应曲线。c、全屏显示图片库中 `black_gray_white.Jpg` 图，旋转检偏器，使得灰度部分达到最亮，而黑白部分亮度机会相同，此时即实现了边缘增强，测量此时的电光效应曲线。比较三条曲线的异同。

## 五、 注意事项

- 1、 程序中所输入的电压值对应于不同的灰度值，这种近似的前提是假设显示器电压和灰度成线性关系，这一点与实际情况稍有差别。实际上电压值与灰度存在一定的偏差，并非完全线性。
- 2、 光电探测器读数并非光强，而是电压值。但是由于光强度与电压值成正比，而且数据处理中进行归一化，因此电压值可以替代光强度值。
- 3、 光电探测器读数按钮分为四个档，从左到右依次为 $\times 1000$ 、 $\times 100$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1$ 。实际数据为读取数值乘以该档倍率。如果读数超出量程可以换用更高档，但是注意倍率关系。
- 4、 当照射到硅光电池上的光强度较大时，会出现读数不稳定，呈现上下波动的现象，这是由于 He-Ne 激光器的输出光能量不稳定造成的，激光器的这种输出瞬间不稳现象几乎无法消除。处理的办法有以下几点。首先，测试前先让激光器工作一段时间以达到较稳定的输出；其次，考虑利用其他更稳定的光源代替；再次，读数时可以观察一段时间，取最高和最低值，然后取平均值；最后，可以选择更高档读数会相对稳定。
- 5、 由于液晶光阀驱动电路内存在  $\gamma$  校正功能（ $\gamma$  校正的作用是使得液晶非线性的电光效应曲线变得尽量线性，可参考有关文献），因此，试验中测量所得的曲线比没有  $\gamma$  校正功能的液晶盒更接近线性。

## 六、数据记录

检偏器每次转过角度\_\_\_\_\_

表 1.2 数据记录表

检偏器角度 电压 光强值						
0						
0.5						
1.0						
1.5						
2.0						
2.5						
3.0						
3.5						
4.0						
4.5						
5.0						

## 附录 1 利用 Microsoft Excel 软件绘制图表的方法

例如我们测得的数据如表 3 所示。

电压 序号	0V	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1	6600	5500	4650	3550	2600	1700	1000	600	300	100	0
2	300	600	1200	2100	3100	3900	4900	5600	6400	7300	7500

### 1 归一化处理

每组数据的每个数均除以其中最大的数。结果见表 4。

电压 序号	0V	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1	1.00	0.83	0.70	0.54	0.39	0.26	0.15	0.09	0.05	0.02	0
2	0.04	0.08	0.16	0.28	0.41	0.52	0.65	0.75	0.85	0.97	1.00

### 2 将数据输入 excel，如下图。

Microsoft Excel - Book1.xls

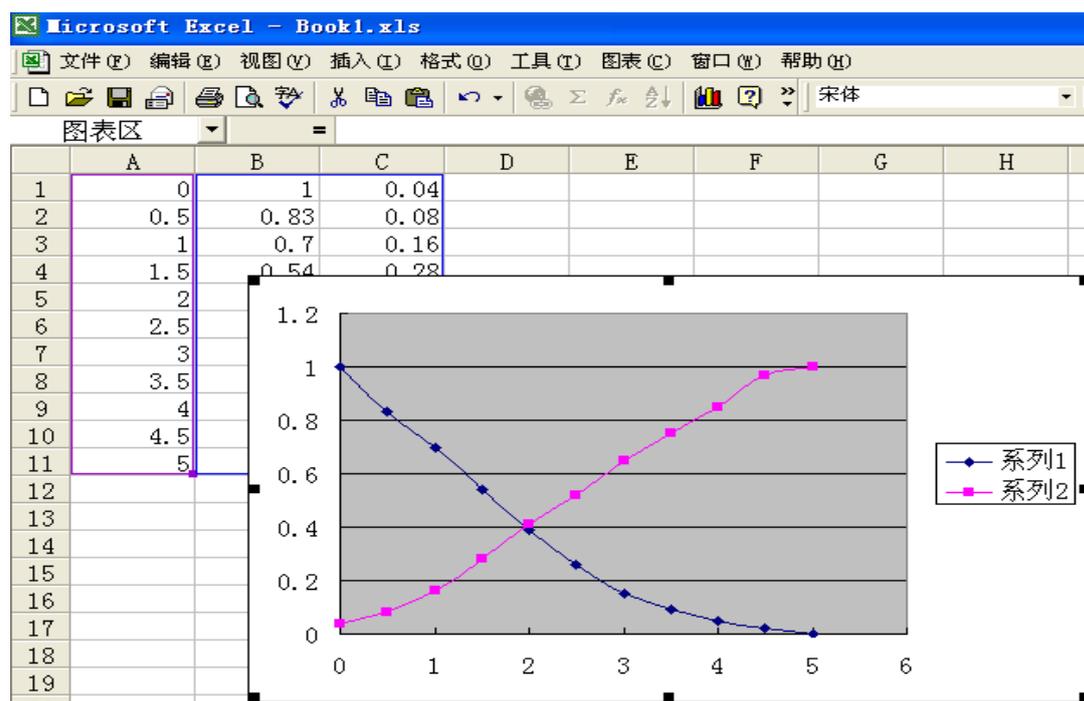
文件(F) 编辑(E) 视图(V) 插入(I) 格式(O) 工具(T) 数据(D) 窗口(W) 帮助(H)

宋体

	A	B	C	D	E	F	G	F
1	0	1	0.04					
2	0.5	0.83	0.08					
3	1	0.7	0.16					
4	1.5	0.54	0.28					
5	2	0.39	0.41					
6	2.5	0.26	0.52					
7	3	0.15	0.65					
8	3.5	0.09	0.75					
9	4	0.05	0.85					
10	4.5	0.02	0.97					
11	5	0	1					
12								

### 3 点击“插入—图表”，选择“XY 三点图”，选择“平滑线散点图”。绘制完成

后如下图。



4 点击图区域内不同位置修改各个参数。

## 实验二 用衍射理论测量电寻址液晶光阀的微结构

### 一、 实验目的

1. 了解液晶光阀的像素结构
2. 理解液晶屏自身结构对频谱的影响
3. 了解衍射理论

### 二、 实验原理

透射式液晶屏的两块平板上分别镀有行电极和列电极，由于电极是不透明的金属掩膜，必然影响液晶的透过率，构成了具有周期性分布的网格结构，每个网格对应一个像素，这种结构被形象的称为“纱窗结构”。我们将每个液晶网格的透明部分占整个像素的比例定义为液晶的开口率。正是由于液晶的这种网格结构，使激光照射到液晶屏上会产生非常明显的点阵状的衍射图样。因此，通过测量衍射频谱就能求出液晶屏的像素尺寸。

设液晶屏像素的几何尺寸为  $a \times b$ ，谱面上相邻谱点的间距为  $u \times v$ ，则根据光的衍射理论有：

$$a = \frac{\lambda}{\sin \theta_x} = \frac{\lambda f}{u}, b = \frac{\lambda}{\sin \theta_y} = \frac{\lambda f}{v} \quad (2-1)$$

实验中，若采用激光器波长  $\lambda = 632.8\text{nm}$ ，傅立叶变换透镜的焦距  $f = 300\text{mm}$ ，可以测得谱面单位间距 ( $u \times v$ ) 为  $10.5 \times 10.5\text{mm}$ ，由公式 (1) 求得液晶的单位像素大小 ( $a \times b$ ) 约为  $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 。

### 三、 实验光路

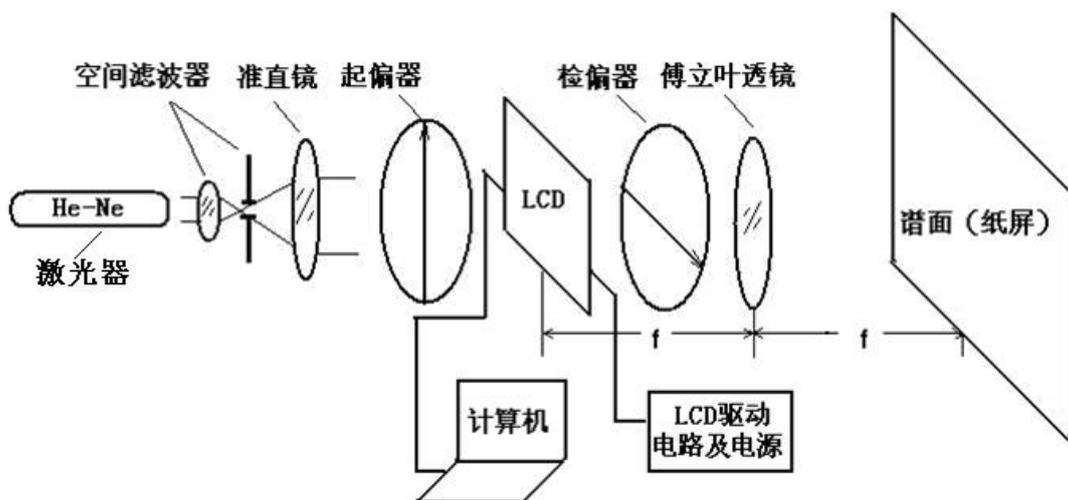


图 2.1 实验光路图

#### 四、 实验步骤

1. 按照“光路调整步骤”部分的说明调好光路，如图 1。
2. 检查系统是否运行正常，运行软件 CGH.exe, 软件操作见软件使用说明。
3. 打开图片 White.bmp，并全屏显示。
4. 傅立叶透镜的后焦面即为谱面，在谱面上放置坐标纸，前后移动接收屏使得每个光点聚焦至最小，标记下衍射谱上中心亮点周围几个点阵的位置（至少描下中心点上下左右各三个点）。
5. 取下坐标纸，测量相邻点的间距，并计算平均值，并由公式（1）计算像素尺寸。
6. 对实验数据进行误差分析。

#### 五、 数据处理

序号	测量谱面		计算液晶像素尺寸	
	u (mm)	v (mm)	a (μ m)	b (μ m)
1				
2				
3				
像素尺寸平均值(μ m)				

#### 六、 思考题

- 1 实验中为何需要全屏显示一张白色图片，不这么做的影响是什么？
- 2 观察频谱面，发现在规则的亮点周围还存在一些不太亮的“杂斑”，如何解释该现象？

## 实验三 光的干涉和衍射实验

### 一、 实验目的

1. 加深对光的干涉和衍射理论的认识。
2. 掌握干涉条纹和衍射条纹的特点。

### 二、 实验原理

#### 1. 杨氏干涉实验

在两个（或多个）光波叠加的区域，某些点的振动始终加强，另一些点的振动始终减弱，形成在该区域内稳定的光强强弱分布的现象成为光的干涉现象。并不是任意的两个光波都能形成干涉现象，根据波的叠加原理，叠加后该点的光强应是该点光振动平方的时间平均值，它不仅与两振动单独在该点产生的强度有关，还与干涉项有关，即与两光波的振动方向及在该点的相位差  $\delta$  有关。由此，产生干涉的条件是：频率相同、振动方向相同、相位差恒定、两叠加光波的光程差不超过光波的波列长度。一般，通过分波前法和分振幅法，可以由一个光波获得两个或多个相干光波。我们这里采用典型的杨氏干涉。

杨氏干涉实验是用分波前法产生干涉的最著名的实验。杨氏装置如图 5.1 所示，S 是一个受到单色光源照明的小孔，从 S 射出的光波照射屏 A 上对称放置的小孔  $S_1$  和  $S_2$ 。由  $S_1$  和  $S_2$  发散出的光波来源于同一光波，因而是相干光波，在距屏 A 为  $D$  的屏 M 上叠加并形成干涉图样。其干涉图样由一系列平行等距的明暗直条纹组成，条纹的分布呈余弦变化规律，条纹的走向垂直于  $S_1$ 、 $S_2$  连线（x 轴）方向。我们定义相邻两个亮条纹或暗条纹的距离为条纹间距  $e$ ，在  $d \ll D$  以及小孔尺寸远小于  $D$  的情况下近似有

$$e = D\lambda / d \quad (3-1)$$

其中  $D$  是两相干光源到观察屏（干涉场）M 的距离， $d$  是两相干点光源  $S_1$ 、 $S_2$  间的距离。本实验中两个小孔的尺寸为  $180\mu\text{m}$ 。

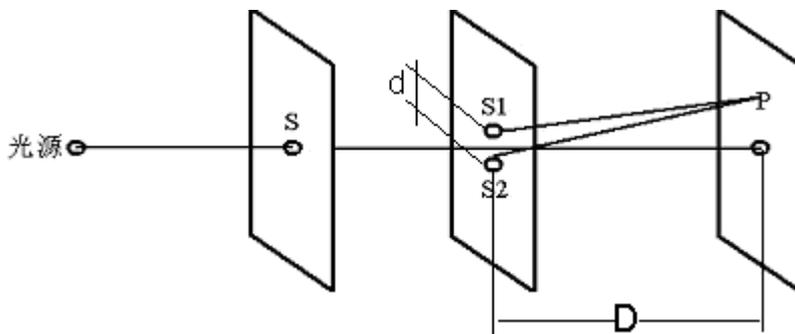


图 3.1 杨氏实验装置

## 2. 光的衍射

在单色点光源和屏幕之间放置一个中间开有圆孔的不透明屏, 会发现光线偏离直线传播而进入到几何阴影区, 并出现亮暗相间的条纹, 这种现象称为光的衍射。光的衍射是光的波动性的主要标志之一。实际上波面的任何变形(通过相位物体)或者说波面(波前)上光场的复振幅分布受到任何空间调制, 都将导致衍射现象的发生, 而使障碍物后的光场的复振幅重新分布。导致衍射发生的障碍物称作“衍射屏”。

### 1) 矩孔衍射

选取矩孔中心作为坐标原点, 由衍射公式, 可得到观察平面上 P 点的强度

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (3-2)$$

其中  $I_0$  是  $P_0$  点的强度,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为

$$\alpha = \frac{kla}{2} = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta_x, \quad \beta = \frac{kwb}{2} = \frac{\pi}{\lambda} b \sin \theta_y \quad (3-3)$$

其中  $a$  和  $b$  分别是矩孔沿  $x$  和  $y$  轴的宽度,  $l$  和  $w$  分别表示  $x$  和  $y$  坐标的方向余弦, 表明 P 点的强度与它的两个坐标有关。

对  $x$  轴上的点的强度分布, 这时  $w = 0$ , 故强度分布公式 (3-3) 变为

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (3-4)$$

在  $\alpha = 0$  处 (对应于  $P_0$  点) 有主极大,  $\frac{I}{I_0} = 1$ ,  $\alpha = 0$  即衍射角  $\theta_x = 0$ , 说明抵达  $P_0$  点的衍射光具有相同相位, 因此这个零级衍射斑中心就是几何光学像点, 而在  $\alpha = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots$  处, 有极小值  $I = 0$ , 所以零强度点(暗点)满足条件

$$a \sin \theta_x = n\lambda \quad n = \pm 1, \pm 2, \quad (3-5)$$

相邻两个零强度点之间的距离与宽度  $a$  成反比。同理还能确定次级大的  $I_0$  值及相应的强度。

矩孔衍射  $y$  轴上的分析方法同  $x$  轴。并可求得中央亮斑的半宽尺寸为

$$\Delta x_0 = \frac{\lambda}{a} f \quad \Delta y_0 = \frac{\lambda}{b} f \quad (3-6)$$

### 2) 单缝衍射

如果矩形孔一个方向的宽度比另一个方向的宽度大得多，比如  $b \gg a$ ，矩孔就变成狭缝，试验中可以观察到单缝夫琅和费衍射的图样。显然单缝衍射在  $x$  轴上的衍射图样分布为

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (3-7)$$

式中，  $\alpha = \frac{kla}{2} = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$

根据前面的讨论，可知在单缝衍射图样中，中央亮纹的角半宽度为

$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{a}$$

由于观察位置在透镜焦面上，因此中央亮斑半宽度近似为

$$\Delta x = \frac{\lambda f}{a} \quad (3-8)$$

### 3) 圆孔衍射

假设圆孔的半径为  $a$ ，中心处在光轴上，表征衍射光强度的公式为

$$I = I_0 \left[ \frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2 \quad (3-9)$$

$I_0$  表示中心点处的光强度， $I$  表示半径为  $r$  处的光强度， $J_1(Z)$  为贝赛尔函数， $Z = ka \theta$ ， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  表示波矢， $\theta = \frac{r}{f}$ ， $\theta$  或者  $r$  相等出光强度一样，因此衍射图样时圆环条纹。

在衍射图样中光能绝大部分集中在中央亮斑内，这一亮斑称为艾里 (Airy) 斑，它的半径  $r_0$  由对应于第一强度为 0 的  $Z$  值决定：

$$Z = \frac{ka r_0}{f} = 1.22\pi$$

因此  $r_0 = 1.22 f \frac{\lambda}{2a} \quad (3-10)$

此式表明衍射斑的大小与圆孔的半径成反比，而与光波的半径成正比，这些规律与矩孔和单缝衍射完全类似。

### 4) 多缝衍射

多缝衍射的实验装置与上同， $P$  点处的光强分布公式为：

$$I(P) = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left( \frac{\sin \frac{N}{2} \delta}{\sin \frac{\delta}{2}} \right)^2 \quad (3-11)$$

其中  $I_0$  是单缝在中心点产生的光强,  $\alpha = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$ ,  $a$  为单缝宽度,  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$ , 其中  $d$  为光栅常数 (即一个缝宽和一个间距之和),  $\theta$  为衍射角,

$N$  表示缝数目。  $\left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$  称为单缝衍射因子,  $\left( \frac{\sin \frac{N}{2} \delta}{\sin \frac{\delta}{2}} \right)^2$  称为多光束干涉因子, 因

此多缝衍射也是衍射和干涉两种效应共同作用的结果。单缝衍射因子与单缝本身的性质有关, 多光束干涉因子来源于狭缝的周期行排列结构, 与单缝本身性质无关。本实验的目的是观察多缝衍射图样, 增加感性认识。

### 三、 实验光路

#### 1. 杨氏干涉

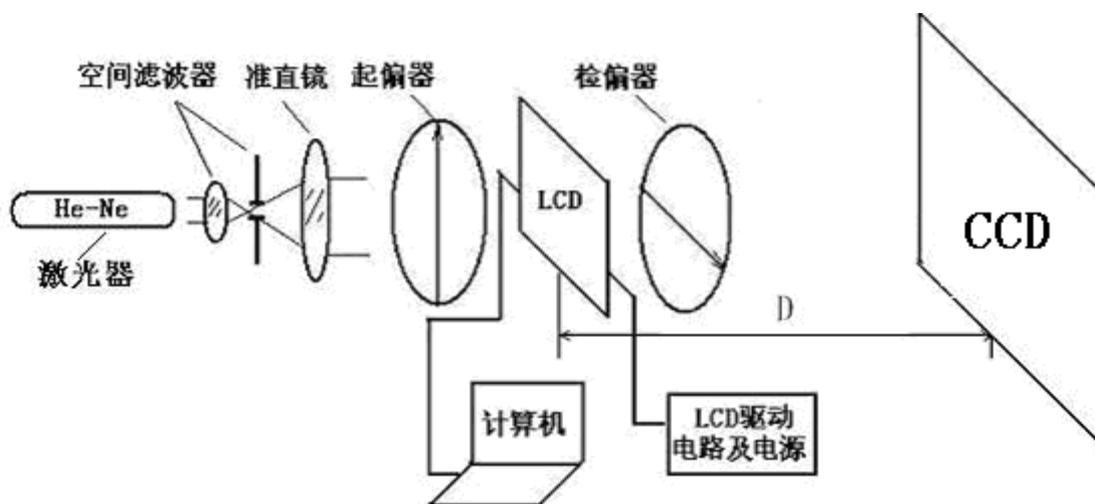


图 3.2 干涉实验系统

两相干小孔由液晶板显示, CCD 平面到液晶光阀平面的间距就是观察屏到小孔的距离  $D$ 。激光器的波长  $\lambda = 632.8\text{nm}$ 。

#### 2. 衍射

这里仍旧由液晶光阀来显示矩孔、单缝、圆孔和多缝, 透镜应尽量接近液晶光阀, CCD 放在透镜的后焦面上。用 CCD 显示终端来进行观察并测量衍射尺寸。

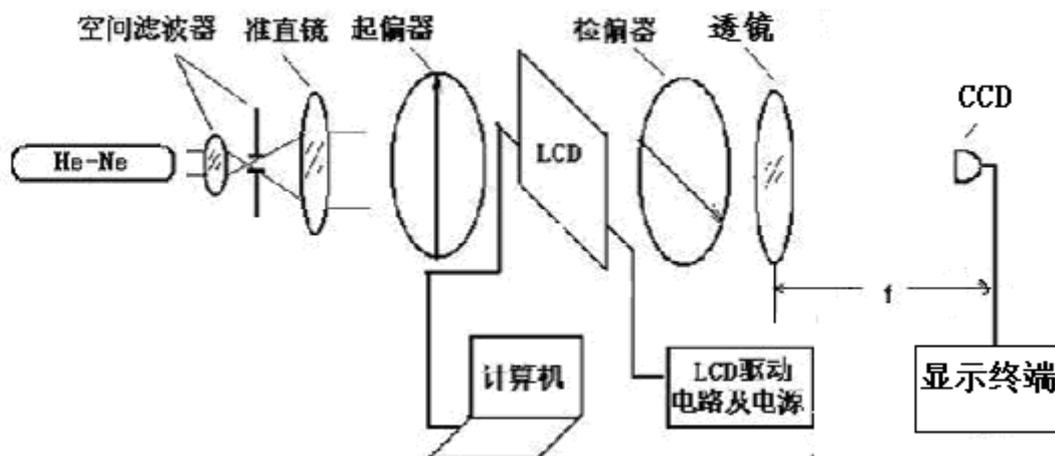


图 3.3 衍射测量实验系统

#### 四、 实验步骤

1. 按照“光路调整步骤”部分的说明调好光路，如图 3.2。
2. 连接 CCD 和其显示终端并调整使 CCD 正常工作，然后旋下 CCD 的镜头部分。
3. 检查系统是否运行正常，运行软件 CGH.exe, 软件操作见软件使用说明。
4. 从程序 CHG 界面中点击“干涉和衍射—杨氏干涉”，输入两个小孔之间的距离  $d$ ，如输入值在 0.30—2mm。然后选择全屏按钮，移动 CCD 观察接收的干涉条纹，直到条纹最清晰为止，记录此时液晶板到 CCD 的距离  $D$ ，并测量 CCD 显示器上的条纹间距  $e'$ 。由于 CCD 到显示终端的放大尺寸经验标定值为 24 倍，则条纹实际间距可以表示为  $e = e'/24$ 。同时根据公式 (1) 计算出理论值对照。
5. 输入不同的两小孔间距离值，重复步骤 3，将测的数据填入表一。
6. 调整光路，如图 3.3。
7. 程序界面中点击“干涉和衍射—典型孔径的夫琅和费衍射—矩孔衍射”。输入矩孔的水平方向和垂直方向的尺寸（典型值在 0.5—1.5mm），点击全屏按钮显示。沿光轴前后移动 CCD 观察接收的衍射条纹，直到条纹最清晰，即移到了傅立叶透镜焦面上。测量此时 CCD 显示器上中央亮斑的尺寸，按照步骤三的方法计算出实际亮斑尺寸，同时根据公式 (6) 计算出理论值进行比较。将测的数据填入表二。
8. 按照实验步骤 6，选择“单缝衍射”（典型值在 0.15—0.5mm）。改变输入值的大小，观察图样的变化情况，测量条纹间距，并与理论值比较。填入表三。
9. 按照实验步骤 6，选择“圆孔衍射”（典型值在 0.3—1mm）。改变输入值的大

小，观察图样的变化情况，测量中心亮斑直径，并与理论值比较。填入表四。

10. 点击程序界面上“干涉和衍射—多缝衍射”，输入缝数，缝宽，缝间距，如 4、0.2-0.5mm、0.2-0.5mm，观察多缝衍射现象中主极大和次极大的存在情形。

## 五、 实验注意事项

1. 注意环境光线不要太强，最好在暗室内实验
2. 通过调节 CCD 显示终端的对比度和亮度，可以使得显示结果达到最清晰
3. 由于液晶像素尺寸、CCD—显示终端的放大率以及其他误差的影响，导致实测值与理论计算值存在一定的偏差。
4. 调整好光路后，将各个滑块计时固定，否则容易碰掉或摔坏。

## 六、 实验记录 and 数据处理

1. 数据表格一：杨氏干涉

序号	双孔间距 $d$ (mm)	小孔到观察屏的距离 $D$ (mm)	测得条纹间距 (mm)	理论计算条纹间距 (mm)
1				
2				
3				

2. 数据表格二：矩孔衍射（透镜  $f = 300mm$ ）

序号	x 方向尺寸 (mm)	y 方向尺寸 (mm)	x 方向测得中央亮斑尺寸 (mm)	x 方向理论计算中央亮斑尺寸 (mm)	y 方向测得中央亮斑尺寸 (mm)	y 方向理论计算中央亮斑尺寸 (mm)
1						
2						
3						

3. 数据表格三：单缝衍射

序号	缝宽 (mm)	0 级亮纹实验测量宽度 (mm)	0 级亮纹理论计算宽度 (mm)
1			
2			
3			

4. 数据表格四：圆孔衍射

序号	圆孔尺寸 (mm)	实验测量艾里斑半径 (mm)	理论计算艾里斑半径 (mm)
1			
2			
3			

## 实验四 计算全息光学实验

### 一、 实验目的

1. 了解全息原理和计算全息的特性。
2. 进行全息图的光学再现

### 二、 实验原理

#### 1. 全息原理

全息术是利用光的干涉和衍射原理,将物体发射的特定光波以干涉条纹的形式记录下来,并在一定条件下使其再现,形成原物体逼真的立体象。由于记录了物体的全部信息(振幅和位相),因此称为全息术或全息照相。

全息照相分两步:波前记录和波前再现。波前记录是将物体射出(间接)的光波与另一个光波——参考光波相干涉,用照相方法将干涉条纹记录下来,称为全息图或全息照片。全息图具有栅状结构。当用原记录时的参考光或其它合适的光波照射全息图时,光通过全息图后发生衍射,其衍射光波与物体光波相似构成物体的再现象。

我们将全息过程用简单的数学公式来表示。将坐标面  $xoy$  取在全息图平面上,原点  $o$  在全息图的中心,  $z$  轴垂直于全息图平面,  $xz$  面平行于参考光束和物光束主光线的入射面。光波自左向右传播。物在  $xy$  面的左边为实物,在右边为虚物;象在  $xy$  面的左边为虚像,右边为实像,对于一般的线段自左向右为正,自由向左为负。

设在全息图平面上物光、参考光和再现用的照明光的复振幅分别为:

$$\begin{aligned}o(x, y) &= O_0(x, y) \exp[j\varphi_O(x, y)] \\r(x, y) &= R_0(x, y) \exp[j\varphi_R(x, y)] \\c(x, y) &= C_0(x, y) \exp[j\varphi_C(x, y)]\end{aligned}\quad (4-1)$$

式中  $O_0(x, y)$ 、 $R_0(x, y)$  和  $C_0(x, y)$  是实数,表示振幅分布。 $\varphi_O(x, y)$ 、 $\varphi_R(x, y)$  和  $\varphi_C(x, y)$  也是实数,表示位相分布,位相分布用相对于原点处光线的位相差表示。

如图 4.1 所示

$$\varphi_O(x, y) = k_0(\overline{QO} - \overline{oO}) \quad (4-2)$$

$$\varphi_R(x, y) = k_0(\overline{QR} - \overline{oR}) \quad (4-3)$$

式中  $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ ， $\lambda_0$  是记录时的波长。

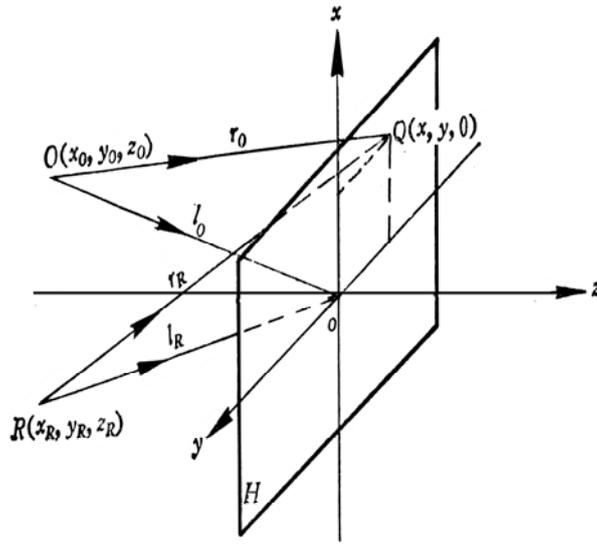


图 4.1 全息过程示意图

在  $xy$  平面上，参考光和物光相叠加以后的强度公式可写成下述形式

$$\begin{aligned} \Phi &= (o+r)(o^*+r^*) = oo^*+rr^*+or^*+o^*r = O_0R_0\{\exp[j(\varphi_O - \varphi_R)] \\ &+ \exp[-j(\varphi_O - \varphi_R)]\} = O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos(\varphi_O - \varphi_R) \end{aligned} \quad (4-4)$$

在线性记录条件下，代入  $\tau_H = \beta_0 + \beta H_v = \beta_0 + \beta t \Phi$ ，即可求得全息图的复振幅投射系数：

$$\tau_H = \beta_0 + \beta t [O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos(\varphi_O - \varphi_R)] \quad (4-5)$$

波前再现过程用照明光波照射全息图。透过全息图的光波复振幅为  $c\tau_H$ 。当不考虑光能的分配问题，只研究衍射波的特点时，可忽略其中的常数项，简单地写成：

$$\begin{aligned} i \propto c\Phi &= c(O_0^2 + R_0^2) + cor^* + co^*r = C_0(O_0^2 + R_0^2) \exp(j\varphi_C) \\ &+ C_0R_0O_0 \exp[j(\varphi_C + \varphi_O - \varphi_R)] + C_0R_0O_0 \exp[j(\varphi_C - \varphi_O + \varphi_R)] \end{aligned} \quad (4-6)$$

这就是全息照相的基本公式。式中第一项代表直射光，第二项是原始象项，第三项是共轭象项（因第二项含  $o$ ，第三项含  $o^*$ ）。

应当指出，一般情况参考光是较纯的平面波或球面波，而物体都有一定的大小。也就是说参考光源可看作点光源，而物体则应看作是许多物点  $o_1$ 、 $o_2$ 、 $o_3$  ……

的集合。设自物体上各点发出光波的复振幅分别用  $o_1 = O_{10} \exp(j\varphi_1)$ 、 $o_2 = O_{20} \exp(j\varphi_2)$ 、 $o_3 = O_{30} \exp(j\varphi_3)$ ……表示，参考光和照明光仍不变，则在线性记录条件下，再现光波可写成：

$$\begin{aligned} i &= c\Phi = c(o_1 + o_2 + o_3 + \dots + r)(o_1^* + o_2^* + o_3^* + \dots + r^*) \\ &= c(o_1 o_1^* + o_2 o_2^* + o_3 o_3^* + \dots + o_1 o_2^* + o_1^* o_2 \dots + rr^*) + \quad (4-7) \\ &\quad c(o_1 + o_2 + o_3 + \dots)r^* + c(o_1^* + o_2^* + o_3^* + \dots)r \end{aligned}$$

上式与式 (4-6) 比较，代替其中  $cO_0^2$  项的是：

$$c(o_1 o_1^* + o_2 o_2^* + o_3 o_3^* + \dots + o_1 o_2^* + o_1^* o_2 \dots) \quad (4-8)$$

括号中前一部分是物体各点间的自相干项，后一部分是各点之间的互相干项，因为物体上各点相距很近，在全息图中记录的干涉条纹的空间频率很小。在波前再现过程中其衍射广播偏离直射光的角度很小，因而互相干项产生的衍射光散射在照明光波的附近，形成一种晕轮光。在离轴全息的情况下，适当地加大物光和参考光之间的夹角，互相干项可以不干扰物体的再现象。

## 2. 计算全息原理

如果不用干涉纪录而用人工的方法制作全息图，这就是计算全息 (CGH)。计算全息最早是 Kozma 和 Kelly 于 1965 年提出来的。先用计算机算出所需要的信号的傅立叶频谱，然后用黑白线条对这个频谱进行编码，用放大的尺寸进行绘制，最后以合适的尺寸复制在透明胶片上。到 1966 年这种方法被推广到二维，不过过去是人工计算，到现在使用计算机，可以对一些复杂的物体来制作全息图。一般计算全息的制作过程分为五步：抽样、计算、编码、绘制和照相缩小。

若物面大小为  $2A_x \cdot 2A_y$ ，全息图面的大小，即物体光波的频带宽度为  $2B_x \cdot 2B_y$ ，如图 4.2 所示。根据抽样定理，物面的抽样间距为  $X_0 = 1/2B_x$ ， $Y_0 = 1/2B_y$ 。全息图面的抽样间距为  $F_x = 1/2A_x$ ， $F_y = 1/2A_y$ ，抽样数为  $N=4A_x B_y$ ， $M=4A_y B_x$ ，即抽样数等于物体的空间带宽积。物函数在抽样点的值为  $g_{n,m} = g_{n,m}(nX_0, mY_0)$  为提高成像质量，物函数  $g_{n,m}$  还必需进行随机处理。

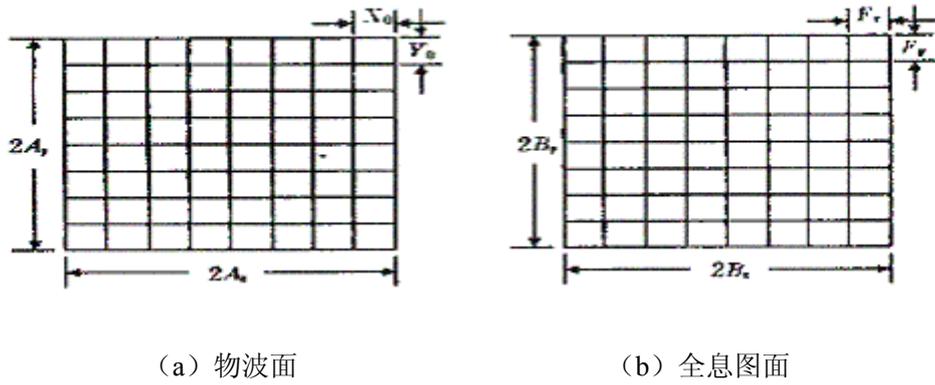


图 4.2 物平面和全息图面的抽样

其次用离散付里叶变换式

$$G_{k,l} = \frac{1}{4B_x B_y} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_{n,m} e^{-j2\pi \frac{kn+lm}{N}} \quad (4-9)$$

计算全息图面上抽样点的复振幅。计算时，为缩短计算时间采用快速付里叶变换（FFT）程度，经计算的 $G_{k,t}$ 一般为复数，即 $G_{k,t} = C_{k,t} + jD_{k,t}$ 。其振幅和位相分别为：

$$A_{k,l} = \sqrt{C_{k,l}^2 + D_{k,l}^2} \quad (4-10)$$

$$\Phi_{k,l} = \text{tg}^{-1} \frac{D_{k,l}}{C_{k,l}} \quad (4-11)$$

再采用相应的编码方式编码，把 $A_{k,l}$ 或 $\Phi_{k,l}$ 值在全息图上的 $k,l$ 格中表示出来。

当数字计算机完成对振幅和位相的编码之后，将全息图显示在 LCD 液晶光阀。这样，透射型 LCD 就成为实时计算机制全息图，可用作实时相干光学住处处理系统的空间滤波器。

### 三、 实验光路

如图 4.3 所示，透射型电寻址液晶光阀与计算机视频输出联接，接受其调制信号。计算机输出全息图的电信号到液晶光阀上，由驱动电路驱动的 LCD 根据寻址电信号改变其每一个液晶像素的透过率，从而把电信号转换成空间的光强分布。

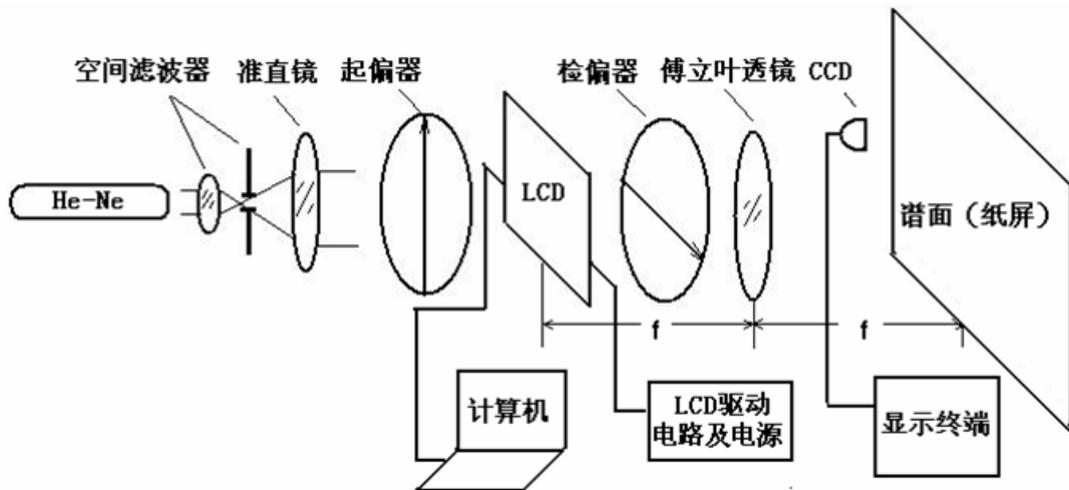


图 4.3 实验光路图

激光器出射的光束经由显微物镜扩束、小孔滤波和准直透镜准直（也可以不准直）后，激光束照射记录着全息条纹的液晶光阀，全息条纹将入射的激光向特定的方向衍射，衍射光线经过傅里叶变换透镜会聚形成物体的像。

#### 四、 实验步骤

1. 根据“光路调整步骤”说明调好光路，如图 4.3。
2. 连接 CCD 和其显示终端并调整使摄像头正常工作，然后旋下 CCD 的镜头部分。
3. 检查系统是否运行正常，运行软件 CGH.exe，软件操作见软件使用说明。
4. 程序界面上选择**打开按钮**，从原图文件夹中选择一张原图。为便于观察，最好选择由简单的几何线条构成的图片。
5. 点击**全息变换**，选择**实部编码 (Re)**、**虚部编码 (Im)**、**位相编码 (Ph)**中的一种，用计算全息程序生成全息图。
6. 选择全屏显示。
7. 移动接收屏直至观察到清晰的再现像，或者利用 CCD 接收此时的再现像。
8. 选择其他编码方式，观察不同编码方式下的全息图和再现像。
9. 重复步骤 4—8，选择其他图片进行实验。
10. 在程序中打开一幅全息图，选择按钮 **Am**，可以观察到计算机模拟再现像。

#### 五、 思考题

1. 除了傅立叶变换计算全息图，还有什么其他变换类型全息图。
2. 目前使用的编码方式并非最优的，能否设计一种更简便、快捷的编码方式。

## 实验五 全息图衍射效率的测量实验

### 一、 实验目的

1. 了解全息图衍射效率的基本概念。
2. 掌握全息图的衍射效率的测量方法。

### 二、 实验原理

全息图的衍射效率定义为衍射的成象光波的功率和再现用的照明光的总功率之比。因此，为了得到明亮的再现现象，需要提高衍射效率。

#### 1) 正弦全息图的衍射效率

对于正弦全息图，它的振幅透射率为：

$$\tau_H = \tau_0 + \tau_1 \cos(2\pi\xi x) = \tau_0 + \frac{\tau_1}{2} (e^{j2\pi\xi x} + e^{-j2\pi\xi x}) \quad (5-1)$$

其中 $\tau_0$ 是平均透射率， $\tau_1$ 是调制幅度。当 $\tau_0 = \frac{1}{2}$ 和 $\tau_1 = \frac{1}{2}$ 时， $\tau_H$ 达到最大值，此时

$$\tau_H = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi\xi x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} (e^{j2\pi\xi x} + e^{-j2\pi\xi x}) \quad (5-2)$$

它相当于由离轴平面参考波与轴向平面波产生干涉所形成的计算全息图。

假设全息图是由振幅为 $a$ 的轴向平面光波照明，由公式(5-2)可以看出，从全息图所衍射出来的光波为零级和正、负一级衍射光。再现的正、负一级衍射光的振幅为：

$$a \frac{\tau_1}{2} = \frac{a}{4} \quad (5-3)$$

此时衍射效率定义为一级衍射光波的功率与照明全息图的功率之比，并且考虑到再现用的照明光波和衍射出来的光波是均匀的，在透射率的定义中用强度来代替功率。因为强度与振幅的平方成比例，所以此时衍射效率为：

$$\eta = \frac{\left(\frac{a}{4}\right)^2 \sum_H}{a^2 \sum_H} = \frac{1}{16} = 6.25\% \quad (5-4)$$

式中 $\sum_H$ 是全息图的面积。在实际中，一般达不到6.25%这一最大的衍射效率。

#### 2) 矩形全息图的衍射效率

对于矩形全息图，它的透射率为：

$$\begin{aligned}\tau_H &= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos(2\pi\zeta x) - \dots + \dots \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} [e^{j2\pi\zeta x} + e^{-j2\pi\zeta x}] - \dots + \dots\end{aligned}\quad (5-5)$$

公式 (5-4) 中头两项表示零级和正、负一级衍射光, 有  $\tau_0 = \frac{1}{2}$ ,  $\tau_1 = \frac{2}{\pi}$ , 则正、负一级的振幅为:

$$a \frac{\tau_1}{2} = \frac{a}{\pi} \quad (5-6)$$

同正弦全息图的衍射效率的计算, 有正、负一级的衍射效率为:

$$\eta = \frac{(\frac{a}{\pi})^2 \sum_H}{a^2 \sum_H} = \frac{1}{\pi^2} = 10.13\% \quad (5-7)$$

可见矩形全息图一级象的衍射效率比正弦型的要高一些。这样, 我们看到改变透射函数的波型, 就可以适当的提高衍射效率。

在测量实验中, 为了测量容易和区分液晶光阀自身周期结构的产生的衍射, 我们在全息图后放置一个透镜。由于各个衍射不重叠的位置与液晶光阀的距离比较远, 放置透镜可以起到汇聚光线作用, 从而可以缩短测量光路。由于每个衍射级相当于不同倾斜角的平面波, 所以每级衍射在透镜的后焦面上分别汇聚成一个光斑。我们测量焦面上的各光斑上的功率, 也就测量得到相应衍射级的功率。

### 三、实验光路

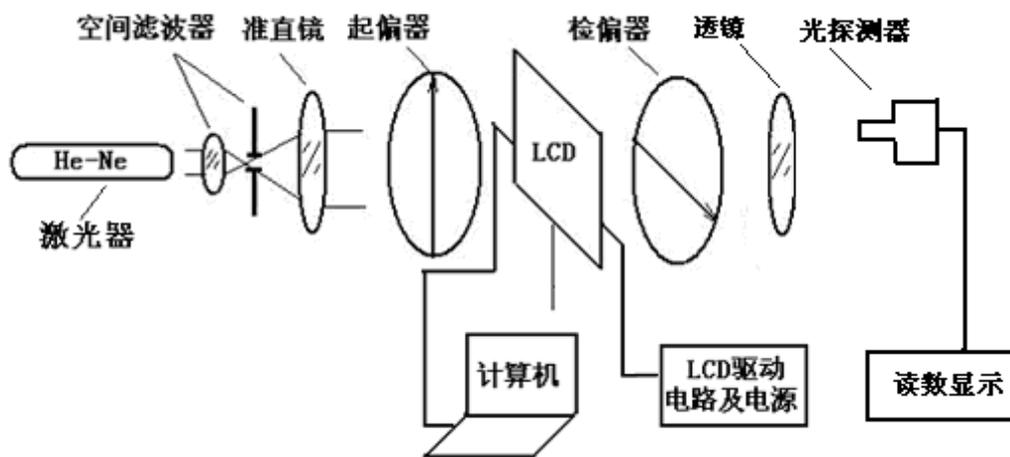


图 5.1 实验系统示意图

### 四、实验步骤

1. 打开图片 White.bmp, 并全屏显示。

2. 在透镜的后焦面上，用光电探测器接收液晶光阀的中心零级衍射光斑，用坐标值(0,0)标记（见图 5.2），读取此时显示的光强值  $I_0$ 。
3. 打开**正弦全息图**，并全屏显示。用纸屏在透镜的后焦面上，可以观察到，在液晶光阀的任意一级衍射上卷积了正弦全息图的零级和正负一级衍射，出现了水平排列的三个亮斑。
4. 移开纸屏，用光电探测器分别接收液晶光阀的中心零级衍射（0,0）上的全息图的零级和正负一级。注意探测器前方需要用一有窄缝的纸板遮挡，保证只有某一级光斑入射到探测器的接收面上，读取此时的显示的光强值  $I_E^0$ ， $I_E^1$  和  $I_E^{-1}$ 。
5. 重复步骤 2 到 4，测量液晶光阀的（0，1）、（0，-1）、（1，0）和（-1，0）衍射上的全息图的零级和正负一级的光强值。
6. 打开图片**矩形全息图.bmp**，全屏显示。重复步骤 2 到 5。记录此时光强度值。
7. 根据公式  $\eta = I_E/I_0 = (I_E^1 + I_E^{-1})/2I_0$ ，计算出两种全息图的测量所得衍射效率。

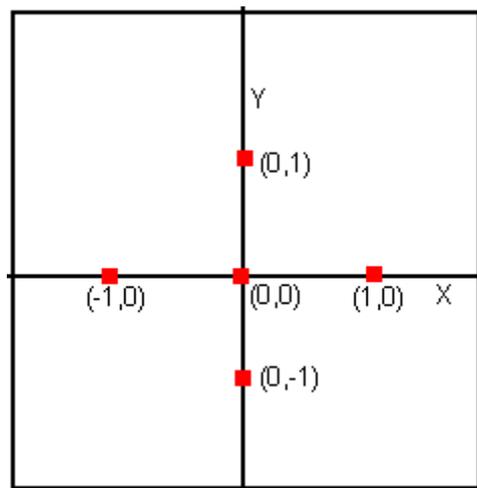


图 5.2 各衍射光斑在接收屏上的坐标位置

## 五、 实验数据

正弦全息图：

液晶光阀的衍射级	没有全息衍射时的透射光强 $I_0$	全息图的正一级衍射像的光强 $I_E^1$	全息图的负一级衍射像的光强 $I_E^{-1}$	全息图的衍射效率 $\eta = I_E/I_0 = (I_E^1 + I_E^{-1})/2I_0$
(1, 0)				
(0, 1)				
(0, 0)				
(-1, 0)				
(0, -1)				

矩形全息图：

液晶光阀的衍射级	没有全息衍射时的透射光强 $I_0$	全息图的正一级衍射像的光强 $I_E^1$	全息图的负一级衍射像的光强 $I_E^{-1}$	全息图的衍射效率 $\eta = I_E/I_0 = (I_E^1 + I_E^{-1})/2I_0$
(1, 0)				
(0, 1)				
(0, 0)				
(-1, 0)				
(0, -1)				

## 六、 思考题

1. 分试影响全息图的衍射效率的因素？
2. 考虑实验中所测量的衍射效率没有包括那些因素的影响？

## 实验六 傅立叶变换性质及全息性质的验证

### 一、实验目的

1. 掌握光学傅立叶变换的性质及全息性质
2. 加深对卷积定理的理解
3. 加深对全息成像原理的认识

### 二、实验原理

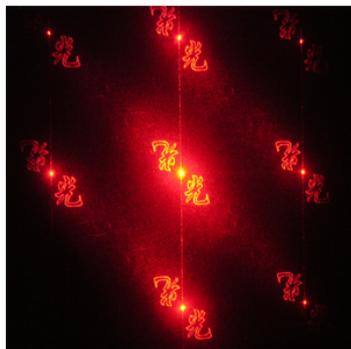
傅立叶透镜将物面图像进行傅立叶变换，在透镜的像面就能得到该图像的频谱。若物面输入的是全息图，则经傅立叶变换后能在像面看到再现像。

#### 1. 伸缩定理：

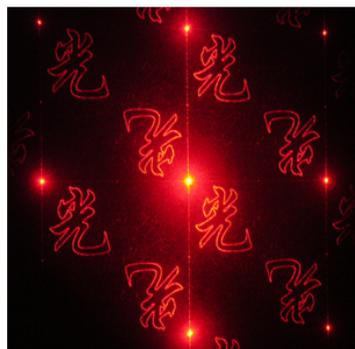
伸缩定理表明频域中坐标  $u$  的收缩，导致空域中坐标  $x$  按同一比例展宽，同时振幅大小相应的降低。反之，频域中坐标  $u$  的展宽，则导致空域中坐标  $x$  按同一比例收缩，同时振幅的大小相应的增加。用公式表示则为

$$F(au) = F\left[\frac{1}{|a|}f\left(\frac{x}{a}\right)\right] \quad (6-1)$$

在实验中，计算傅里叶变换全息图放大，则再现像变小；反之，计算傅里叶变换全息图缩小，则再现像放大。如图 6.1。



(a) 缩放比 100%



(b) 缩放比 50%

图 6.1 不同缩放比的再现像

#### 2. 旋转定理：

如果全息图旋转了  $\theta_0$  度，则其再现像也将旋转  $\theta_0$  度。

在实验中，先分别对两幅不同图像进行全息变换，然后将其中一幅全息图旋转  $90^\circ$ ，并与另一幅合并，如图 6.2 所示。可观察到合并后的全息图再现像如图 6.3。

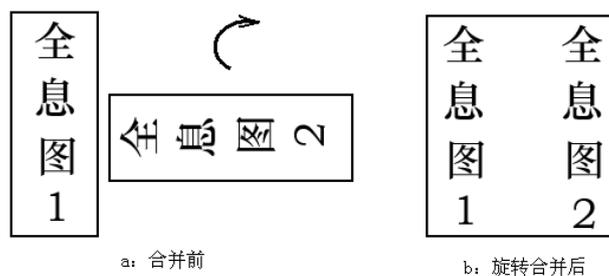


图 6.2 全息图的旋转合并



图 6.3 分别写有“计算”和“全息”两字的全息图旋转合并后的再现像

### 3. 全息图的互补定理:

对全息图进行亮度反转，全息图中亮度高的区域变成低亮度，而亮度低的区域变亮。观察其再现像，典型的实验结果如图 6.4，会发现再现像不发生变化。

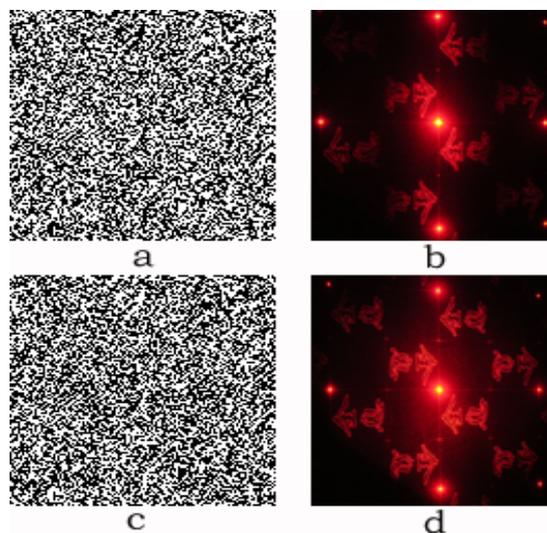


图 6.4 互补全息图及其再现像

### 4. 全息裁减:

全息图的任何局部都能再现原图的基本形状。物体上任意点散射的光可抵达全息图的每点或每个局部，与参考光相干涉形成基本全息图，也就是全息图的每点或局部都记录着来自所有物点的散射光。显然物体全息图每一个局部都能再现原来的像。实验中这一性质可以得到很好的验证。

## 5. 卷积定理

卷积定理是指两个函数乘积的傅里叶变换，等于各自傅里叶变换的卷积。反之，两个函数卷积的傅里叶变换，等于各自傅里叶变换的乘积。数学表示是

$$F[f(x)g(x)] = F(u) * G(u) \quad (6-2)$$

和

$$F[f(x) * g(x)] = F(u) \bullet G(u) \quad (6-3)$$

简单的演示方法可以将两个间距不同的正交光栅重叠在一起，表示两个图像相乘，用激光照射，在傅里叶变换透镜的后焦面上看到它们的频谱的卷积。

我们已经知道，LCD 液晶光阀自身就是网格结构，如果在液晶屏上显示一副正交光栅图像，如图 6.5 (1)，其效果就类似与两个光栅的叠加。图 6.5 (2) 显示了两个网格在不同间距比例下的图像，可以清楚的看出，是各自频谱发生卷积的结果。

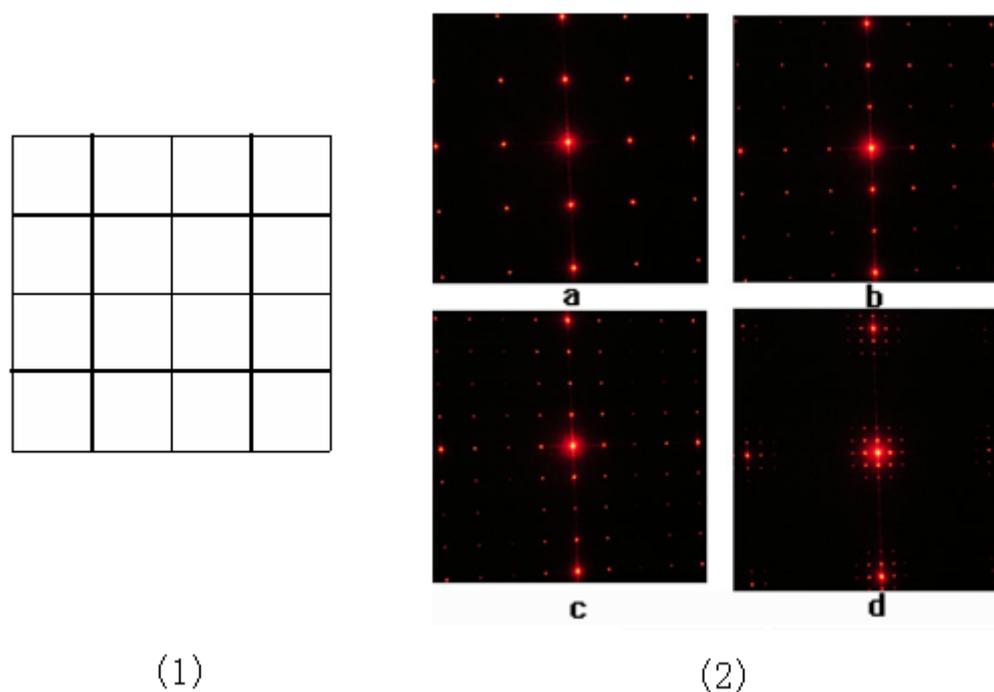


图 6.5 (1) 液晶光阀自身网格 (N1) 和网格图像 (N2) 的叠加图像:  $N2/N1=2$ ;

(2) 液晶光阀自身网格和网格图像的频谱的卷积结果。其中, a:  $N2/N1=2$ ;

b:  $N2/N1=3$ ; c:  $N2/N1=4$ ; d:  $N2/N1=8$

## 三、 实验光路

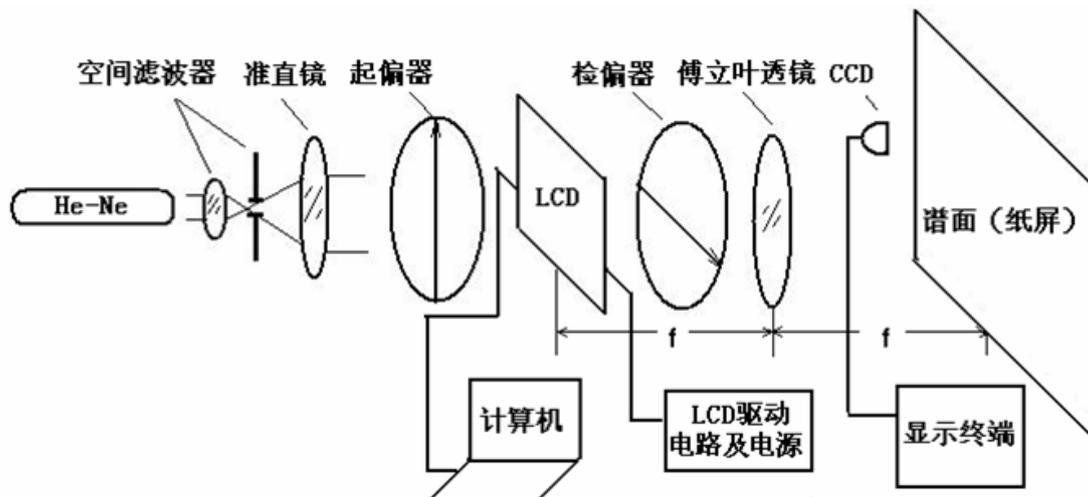


图 6.4 实验光路

#### 四、 实验步骤

1. 根据“光路调整步骤”调好光路。
2. 连接 CCD 和其显示终端并调整使摄像头正常工作，注意旋下 CCD 的镜头部分。
3. 检查系统是否运行正常，运行软件 CGH.exe，软件操作见软件使用说明。
4. 程序界面上选择**打开按钮**，从原图文件夹中选择一张原图。任选一种编码方式（除 Am 之外）进行傅立叶变换，得到的全息图输入 LCD 显示，调整 CCD 位置观察再现像。
5. 验证傅立叶缩放定理。在软件界面上点击**几何变换—缩放**菜单，打开**缩放图像**对话框，在对话框里的**宽度**和**高度**编辑框里输入图像缩放后的数值，如扩大一倍或减小一倍，每次缩放后调整 CCD 位置观察再现像的变化情况。
6. 验证旋转定理。计算产生两幅全息图。在一幅全息图中选中一部分复制并粘贴到另一全息图中，然后将该部分**旋转 90 度**。用纸板接收，看到其中一再现像旋转了 90 度。如果用 CCD 接收，需要适当调整 CCD 的位置。
7. 观察互补全息图再现。对于任意一张全息图，选择软件上**亮度变换**菜单中**图象亮度反转**菜单，得到原图的互补图。观察再现像，对比与反转前有何变化。
8. 观察全息图裁减。对于任意一张全息图，按住鼠标左键选取一定范围的框图，然后拖动到任意位置，观察此过程中的再现像变化情况。
9. 验证卷积定理。全屏显示 white.bmp 图，在傅立叶透镜后焦面上用纸屏接收并观察图像，可以看到液晶器件本身网格结构所产生的点阵，此为液晶屏本身网格结构的频谱，注意观察各点之间的距离。打开图片库中的 grating8.bmp 图（网格尺寸是液晶器件本身网格尺寸的 8 倍），全屏显示，观察此时的点阵情况，类似图 4.6。解释该现象如何验证了卷积定理。该换其他间距的光栅图片，观察卷积结果。

## 五、 思考题

1. 再现像的大小跟那些因素有关?
2. 还有那些方法可以验证傅立叶变换性质?