

空间光调制器原理与应用

一、引言

空间光调制器（Spatial Light Modulator—SLM）是一类能将信息加载于一维或二维的光学数据场上，以便有效地利用光的固有速度、并行性和互连能力的器件。这类器件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、相位、波长和偏振态，或者把非相干光转化成相干光，被广泛应用于光学/数字混合相关、自动模式识别等系统的光电实时接口、阈值开关、输出显示等诸多领域。

空间光调制器主要由许多独立单元构成，这些单元在空间分布成一维或二维阵列，每个单元都可以独立地被光信号或电信号控制，并且按照调制信号改变自身的光学特性，从而对照在其上的光波进行调制。空间光调制器分为光寻址和电寻址两大类。电寻址液晶空间光调制器（LCSLM）是空间光调制器中的重要分支，它将液晶层作为光调制材料，液晶层采用向列型液晶的混合场效应工作模式，在液晶层上施加不同的电场，可以引起液晶分子排列方向的变化，从而引起其光学性质的变化，实现对光信号的调制。由于 LCSLM 制作成品率高，成本低，因此应用广泛，如光学信息处理和光计算机中的图像转换、显示、存储和滤波等等。

空间光调制器可以作为计算全息为载体，计算全息术是计算机技术与光全息术的结合，利用计算机制作全息图，再用光学方法再现。以空间光调制器作为记录全息图的介质，是一种方便的方法，空间光调制器的加载图像可以随时间变化，实现实时调制，可应用于全息光学元件，全息图像相关识别，空间滤波等。

本实验的目的是了解电寻址液晶空间光调制器的结构、工作原理和应用。

二、实验原理

液晶相是物质的一种相态，介于固相和液相之间。处于液晶相的物质，同时具有液体和固体的部分性质。存在液晶相态的物质称为液晶物质，主要包括某些有机化合物和他们的混合物。当这些物质处于液晶相时，就叫做液晶。有人把液晶简单定义为：分子排列成某种规律性的液体。按照分子排列规律的不同，液晶可以粗略地分为近晶型、向列型和胆甾型三类。最常用的向列型液晶分子形状为细长棒状，各分子长轴方向大体一致。用液晶制作空间光调制器时，通常把液晶夹在两块基片之间，形成一个由液晶薄片和基片组成的组件，通称液晶盒。对液晶盒基片内表面经过一定的取向处理，可以使得紧挨基片表面的那层液晶分子按照特定取向排列。

2.1 液晶的电光效应

液晶分子在介电常数、电导率、折射率等方面具有各向异性，当有大量液晶分子规律排列时，它的整体光学和电学性质也呈现各向异性。因此当液晶上所加电场不同时，液晶分子排列状态也不同，液晶盒的双折射性质随之改变，从而导致光学性质发生变化，这就是液晶的电光效应。

1) 电控双折射效应

向列相液晶具有细长的棒状分子结构。这种结构致使在分子的轴向（分子长轴方向）和垂直于轴的方向上具有不同的物理性质。若以 $\varepsilon_{//}$ 表示平行于轴向光的介电常数（非常光的介电常数）， ε_{\perp} 表示垂直于轴向光的介电常数（寻常光的介电常数），则有两种情况， $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp} > 0$ ，或 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp} < 0$ 。称 $\Delta\varepsilon > 0$ 为正性或 P (positive) 型液晶，在外电场作用下，其分子长轴趋向于外场方向排列；称 $\Delta\varepsilon < 0$ 为负性或 N (negative) 型液晶，在外电场作用下，分子长轴趋向垂直于外场方向排列。通常正性液晶的 $\Delta\varepsilon = 10 \sim 20$ ，而负性液晶 $\Delta\varepsilon = -1 \sim -2$ 。

当频率提高到光的范围时，与介电常数有关的极化变为只有电子极化，所以液晶在光波频段，总有 $\varepsilon_{//} > \varepsilon_{\perp}$ ，由于折射率为介电常数的平方根，因此有 $n_{//} > n_{\perp}$ ，即液晶的光学性质类似于正单轴晶体，光轴与分子长轴一致。

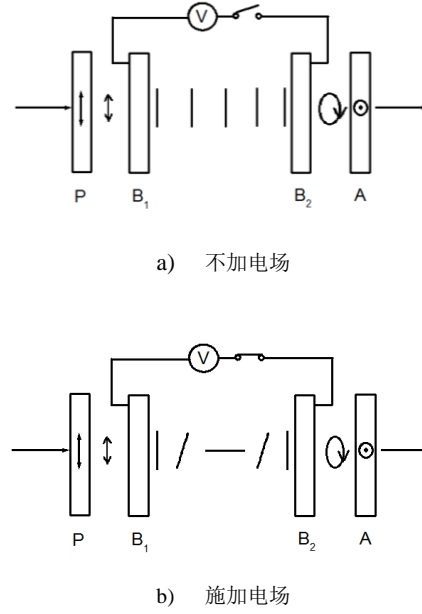


图 1 电控双折射效应

图 1 中 B_1 、 B_2 为液晶盒上下表面基片玻璃，液晶分子长轴平行于液晶盒表面（即沿面排列），a) 为不加电场的情形，液晶盒中液晶分子取向基本一致。当光入射到液晶上时，可发生双折射效应，产生的非寻常光的折射率 n_e 大于寻常光的折射率 n_o ，即 $n_e > n_o$ ，双折射率 $n = n_e - n_o = n_{//} - n_{\perp}$ 。

当对液晶盒施加电场时，如图 1b) 中所示，由于电场对液晶分子的取向作用，p 型液晶分子的长轴将趋于电场方向排列。电场强度不同，对液晶分子取向的影响大小不同，会使分子长轴旋转的倾角不同，造成 n_e 也随之变化，液晶盒整体的双折射效应也将产生改变，这就是液晶盒的电控双折射效应。

若液晶盒位于两个正交的偏振片 P、A 之间，双折射效应随电场的改变使得透射光的偏振状态随之改变，检偏器后透过光强也将不同，从而实现了对外输出光强的调制。

2) 扭曲-向列效应

如果液晶盒上下两基片取向不同，液晶层将分成许多个薄层，每一层内分子取向基本一致，相邻层分子取向逐渐转过一个角度，形成扭曲-向列排列方式。这种结构可以使线偏振入射光的偏振方向跟随分子取向旋转，称为液晶盒的扭曲向列效应，液晶盒的上下两个表面液晶分子的取向夹角被称为扭曲角。

考虑扭曲角为 90° 的液晶盒，当液晶盒上加外电场以后，外电场将改变液晶分子的排列形式。由于是正性液晶，其分子在电场取向作用下沿电场方向排列，亦即趋于垂直于表面排列。但是，因为同时存在基片表面的影响和液晶分子间的相互作用力，所以分子实际上是处于某种“展曲”排列状态，即靠近两个基片处的分子仍是沿面排列，基本不受外电场的影响。但对于在两基片中间的分子来说，由于没有直接受到基片表面的影响，结果会趋于垂直基片表面排列，而且距离基片越远，垂直的程度就越高。

扭曲-向列排列主要是靠各层液晶分子之间的相互作用逐渐由基片向中间传递而造成

的，所以外电场在使分子趋于垂面排列的同时，还必定会减弱这种传递作用，从而在不同程度上破坏了原有的均匀扭曲结构。当外电场比较小时，没有任何一层液晶分子能达到真正的垂面排列，这时各层分子取向的扭曲不再均匀，但仍保持着连续的扭曲结构。当外电场达到一定强度时，处在两基片正中间的那层分子首先变为真正的垂面排列，从而完全切断了液晶盒左右两半分子之间的扭曲方向关系，连续的扭曲结构被彻底

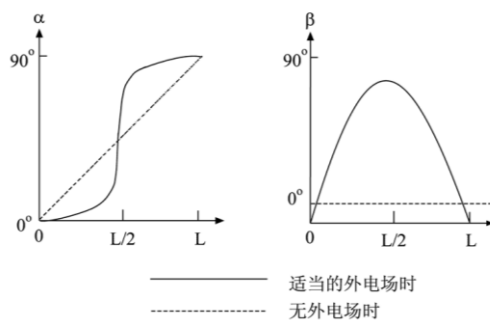
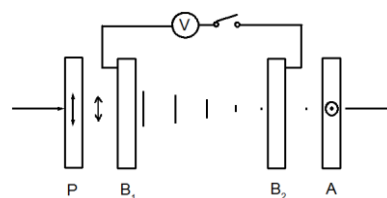
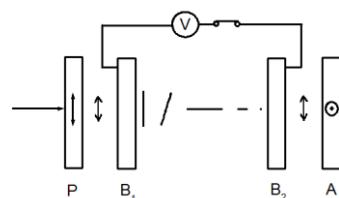


图2 扭曲液晶盒中液晶分子取向示意

破坏，变成了突变扭曲结构。图2中示意性地给出了厚度为 L 的液晶盒中液晶分子取向的分布，其中 β 是预倾角，即液晶分子的长轴方向与基片平面的夹角， α 是扭曲角，指当液晶分子的长轴投影在左侧基片平面上，该投影与基片上的分子长轴方向之间的夹角。 α 和 β 随液晶薄层至左侧基片距离的变化曲线如图2所示。就扭曲情况（ α 角）而言，左半边分子的取向都由左侧基片决定，右半边分子的取向都由右侧基片决定，在中间出现了扭曲角的突变。就倾斜情况（ β 角）而言，从基片表面至两基片中间存在逐渐从 0° 到 90° 的过渡过程。把产生这种展曲排列的外电场强度称作临界电场强度。当外电场继续增大时，具有真正垂面排列（ $\beta=90^\circ$ ）的分子层变厚，而其它地方的扭曲情况不再有明显的变化。



a) 不加电场



b) 施加电场

图3 扭曲-向列效应

若把扭曲角为 90° 的液晶盒位于两个垂直的偏振片P、A之间，且让起偏方向P平行于液晶盒上表面液晶取向，如图3所示。不施加电场时（图3a），由于液晶盒的扭曲-向列效应，左方射入的光经过液晶盒后，偏振方向随之偏转了 90° ，可通过检偏器A，输出亮场。当施加电场，且强度大于临界值时（图3b），由于液晶盒连续扭曲状态被破坏，入射光偏振方向不发生改变，不能透过检偏器A，输出暗场。外加电场在临界值之下时，入射的光可部分透过检偏器，电场强度不同，检偏器后光强也不同，也可实现电场对输出光强的调制。

3) 混合场效应

混合场效应是扭曲向列效应和电控双折射效应的结合。尽管液晶还有多种电光效应可以用来对读出光波进行调制，如动态散射和宾主效应等等，但是目前在光学信息处理领域内，应用较广的液晶空间光调制器对光波的相位、强度及偏振态等参量的控制主要通过混合场效应来实现。

2.2 电寻址空间光调制器

空间光调制器的基本特点在于，它是有许多基本的独立单元组成的一维或二维阵列。这

些独立单元可以是物理上分割的小单元，也可以是无物理边界的、连续的整体，只是由于器件材料的分辨率和输入图像或信号的空间分辨率有限，而形成的一个个小单元。这些小单元可以独立地接收光学或电学的输入信号，并利用各种物理效应改变自身的光学特性（相位、振幅、强度、频率或偏振态等），从而实现输入光波的空间调制或变换。习惯上，把这些小独立单元称为空间光调制器的“像素”，把控制像素的光、电信号称为“写入（光）信号”或“写入（电）信号”，把照明整个器件并被调制的输入光波称为“读出光”，经过空间光调制器后出射的光波为“输出光”。写入信号应含有控制调制器各个像素的信息，把这些信息分别传送到相应的像素位置上去的过程称为“寻址”，如果采用写入电信号来实现这一过程，称为“电寻址”。顾名思义，电寻址液晶空间光调制器（LCSLM）就是将液晶作为工作材料，写入信号为电信号的调制器。

1) LCSLM 结构

电寻址 LCSLM 多采用矩阵寻址的方案，其结构示意图如图 4，a) 为侧视图，b) 为正视图。在扭曲向列液晶盒的一块玻璃基片上有一个电势固定的公共电极，另一块玻璃基片上是各自分立的驱动电极，所有电极按照二维阵列均匀排布，行、列电极之间围成的部分就是电寻址 LCSLM 的像素。每个像素上有一个透明电极，每个电极的电压可由电路独立控制。电寻址 LCSLM 可直接由微机视频显示信号来驱动，对于数字图像中某一像素来说，其灰度值与 LCSLM 中对应液晶像元的驱动电压成特定关系，由灰度级的不同来控制相应液晶像元上的电压，从而实现电寻址。图 4b) 为正视图，一个个透明格子为一个个独立像素，相邻像素之间为控制电路部分，都是不透光的，各像素之间的不透光的电路材料连在一起，被形象地称为“黑栅”。

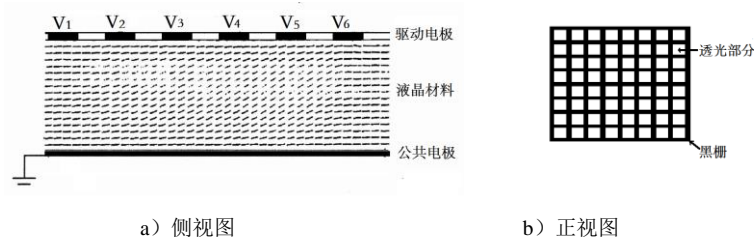


图 4、电控 LCSLM 结构示意图

2) 振幅调制

振幅调制，也即光强度调制，在光开关，光学信号识别，光学全息中有广泛应用。LCSLM 主要利用液晶分子的电光效应，通过外加电场的作用来改变液晶盒的混合场效应，从而改变输出光的偏振态，再配合适当的偏振片，调制输出光的振幅。可参见图 1、图 2 中对电控双折射和扭曲-向列效应的介绍，经过起偏器的读出光为线偏振光，入射到扭曲向列液晶盒上，液晶上所加电压不同时，液晶分子取向不同，从而产生不同的双折射效应和扭曲向列效应，透过光的偏振状态和方向随之不同，特定方向的检偏器后输出光的强度也将不同，既实现了光的振幅调制。输出光强随控制电压，即随写入图像灰度的变化曲线叫做振幅调制曲线。振幅调制曲线决定了振幅型空间光调制器的工作性能，常被称为 LCSLM 的响应曲线或特性曲线。

在很多情况下，输出光的相位也随电压变化而变化，即 LCSLM 相位调制和振幅调制是同时存在的。

3) 黑栅效应

通常，空间光调制器的开口率（像素的有效通光面积与像素总面积之比）仅为 50% 左右，黑栅的存在大大降低了光的利用效率，对空间光调制器的透射率产生影响，同时黑栅的衍射作用引入阵列分布的多个像，也会对成像质量等产生影响，即为“黑栅效应”。文献中报道了多种不同的方法消除黑栅效应，本实验采用的是如图 5 所示 $4f$ 系统加滤波器的方法。L1、L2 为一对等焦距的傅立叶透镜，同轴共焦地放置。相干光照射放在输入面（L1 的前焦面）上的平面物体，则在频谱面（L1 的后焦面，也是 L2 的前焦面）上便出现该物体的频谱，输出面（L2 的后焦面）上出现物体的像。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。本实验中，在频谱面上放置一个光阑作为滤波器，可以有效减少黑栅效应。

LCSLM 对入射光的衍射作用类似于光栅，因此也可以通过测量衍射光斑的分布来测量 LCSLM 的像素大小。

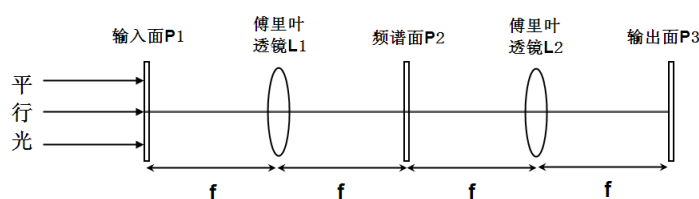


图 5. 4F 系统示意图

2.3 数字全息图再现

在全息技术发展的很长一段时间里，都是通过全息干版来记录全息干涉图样，需要经过曝光、显影、定影等化学处理，过程费时且复杂，干版不能重复使用，无法实现多幅图像的转换显示，而采用空间光调制器作为全息图的载体，同时实现对再现光波的调制的数字全息术就要方便快捷得多，还可以实现实时再现。本实验采用计算机生成计算全息图，用 LCSLM 实现再现的方法，过程可以归纳如下：

- 1) 抽样或采集，将波前信息的连续函数转换为离散函数
- 2) 计算，快速傅里叶变换，得到波前离散函数的频谱
- 3) 编码，将光波复振幅的分布编码为全息图的透过率变化
- 4) 缩放及成图，将全息干涉图记录在元件上，或者加载在空间光调制器上
- 5) 再现，利用光学模拟再现全息图。

本实验中，利用 Matlab 程序计算出输入图像的数字全息图，将数字全息图加载在空间光调制器上，空间光调制器处于振幅调制模式。线偏振的平行光通过空间光调制器和检偏器后，包含了图像的频谱信息，再经过一个傅里叶透镜进行一次逆变换，就能在傅里叶透镜的焦平面上再现出图像。

三、实验装置

本实验基本光路如图 5 所示。He-Ne 激光器加起偏器输出波长为 632.8nm 的线偏振光，利用半波片（波长 632.8 nm），连续改变光的偏振方向与 LCSLM 上表面液晶取向之间的夹角。实验用 LCSLM 为振幅型空间光调制器，总像素数为 1024 pixel×768 pixel，像面尺寸 1.3'，利用 VGA 信号

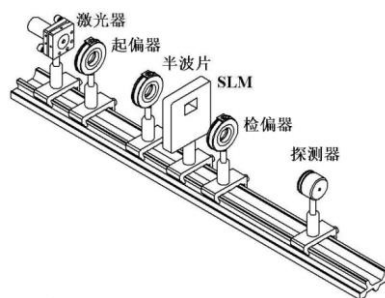


图 5 实验基本光路

实现电寻址。图像变换和全息图再现时，需要用扩束镜和准直镜把激光变成平行光。傅里叶变换透镜焦距为 150mm。探测器根据需要采用功率计探头和 CMOS 摄像头。

四、实验内容

1、振幅调制特性测定

1) 将 LCSLM 输入图像的灰度值选择 0 和 255，分别测试透过光功率随半波片光轴角度的变化，找到对比度（定义为 I_{\max}/I_{\min} ）最大的角度；

2) 以 25 为步长，切换 LCSLM 输入图像的灰度值，测试输出光功率随灰度变化曲线，了解 SLM 的工作特性。

2、图像转换及黑栅效应的消除

基础光路上加扩束器和准直器使 LCSLM 的入射光变成平行光，LCSLM、两个傅里叶透镜和 CMOS 按 4f 系统摆放。

1) 连接 LCSLM，载入图片，对比 4f 系统的频谱位置上有无光阑的成像效果；

2) 旋转半波片，观察不同角度生成的像，用 CMOS 记录明显的正像、负像，以及边缘增强、边缘减弱像。分析原因。

3、全息图的再现

调整光路，把 CMOS 置于恰当的位置上，LCSLM 载入图像的计算频谱图，观察全息图的再现。

4、SLM 像素大小的测量（夫琅和费衍射法）

根据透射光栅的夫琅和费衍射效应，设计方案测量 SLM 像素的尺寸。

五、思考题

1、液晶盒的双折射效应和哪些因素有关？

2、如何判断入射激光偏振方向与液晶盒上表面液晶取向的关系？

3、查询资料了解边缘像（边缘增强像、边缘减弱像）的含义。

4、如何根据光栅衍射规律测量 LCSLM 像素尺寸？

参考文献：

- [1] N. Konforti and E. Marom. Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators. Opt.Lett.1988,13(3):251-253
- [2] 赵达尊,张怀玉. 空间光调制器.北京:北京理工大学出版社,1992
- [3] 李育林,傅晓理. 空间光调制器及其应用. 北京:国防工业出版社,1996.
- [4] 朱成禹.电寻址空间光调制技术的研究.中国科学院研究生院（长春光学精密机械与物理研究所）,2002:1-29
- [5] 颜树华,戴一帆等.电寻址空间光调制器“黑栅”效应的消除方法.光子学报.2002,31(11):1421-1424
- [6] 陈家璧,苏显渝.光学信息技术原理及应用.北京:高等教育出版社,2002