

用液晶光阀进行实时光学数据处理

摘要 本文介绍混合场效应液晶光阀和它在实时相干光学数据处理方面的应用。光阀基本上是一个高分辨率的光学对光学的图象转换器。该器件包括碲化镉光吸收层, 介质反射镜和在玻璃板上沉积铟锡氧化物透明电极之间分层的联苯基液晶层。为降低光电导体的阻抗, 图象直接输入到光电导体上, 在液晶电极上加上交流开关电压以激发器件。交流工作确保器件有较长的工作寿命。液晶以混合场效应方式工作。它利用扭转向列效应产生暗的截止态(没有电压加在晶体上), 利用光的双折射产生亮的导通态。液晶调制相干读出光的相位。用外加的解偏器产生光强调制。

光阀的性能可通过以下几方面的测量来说明: 调制传递函数、分辨率、响应时间, 灵敏度和光学质量, 最后介绍了液晶光阀的应用, 包括非相干到相干的转换、实时相关、雷达信号处理和实际景物感测。

I 引言

混合场效应液晶光阀在实时, 高分辨率, 大屏幕投影显示和光学数据处理的应用方面已得到发展。由于光阀广泛地用于电视和图象显示, 所以正在建立试验性的生产线以便生产这种器件。这对光阀的进一步使用及其用于光学数据处理的费用都将有重要意义。

光阀基本上是一个光学对光学的图象转换器, 它能够接收低光强, 白光或绿光的输入图象并能将它实时转换成具有另一光源光的输出图象。器件被设计成输入和输出光束完全分开且无相互影响。这就使得该器件工作时有很高的灵活性。尤其是可用于波长转换, 并且相干光或非相干光均可用于输入和输出。

器件由多层薄膜组成, 薄膜电控 $2-3\mu\text{m}$ 薄液晶层的光双折射。器件有高分辨率(极限分辨率为大于40线对/mm)、高对比度($>100:1$)、高速(在典型的工作状态周期小于50毫秒)和高输入灵敏度(在阈值近似等于1尔格/厘米²)。孔径尺寸做到50毫米。而且光阀有一系列实际的优点, 结构紧凑偏压耗电低(几毫瓦), 可廉价制造薄膜, 操作

单一, 使用低压电流(有效值5—10伏)。另外, 特别稳定的联苯基液晶材料现在已经使工作寿命超过几千小时。在本文里我们介绍器件的设计、操作和结构。也要对液晶光电结构做稍详细的讨论。用该结构在不降低图象质量的情况下减少液晶层的厚度。最后我们讨论器件的性能和表征器件性能的测量技术。

在文章的第二部分评论文献报导的液晶光阀在光学数据处理方面的许多应用, 包括三维输入目的第一次成功的实时相关; 将光阀用于脉冲压缩和付立叶变换的光学雷达信号处理; 使用混合图象增强光阀器件的超低光平图象放大器; 刃边增强的及光学图象相减。

II 器件的描述

1 概述

图1表示器件的一般结构。这个交流光阀由若干个夹在两片玻璃板之间的多层结构薄膜组成。一个低压(5—10伏有效值)音频电源与两个外部铟锡氧化物薄膜透明电极相接, 这样电压加在整个多层薄膜上。光电导体(硫化镉)和阳光层(碲化镉)相连构成一个检波异质结。介质反射镜和阻挡层把

光电导体和读出光束分隔开。这是交流光阀的设计特点之一，因为它能在不考虑两束光的光谱组成的情况下使器件同时写入和读出。此外，介质反射镜防止直流通通过液晶，以提高器件的寿命。最后，可“调谐”反射镜以反射任何部分的可见光谱。从而使反射镜隔离效率最佳化，同时使器件反射率最大。此反射镜与化学惰性绝缘层 SiO_2 一起约束两个分界面的液晶确保器件有较长的寿命。在此器件中所用的液晶是典型的联苯基向列材料。

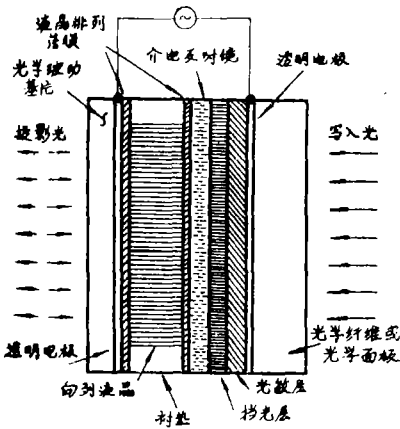


图1 液晶光阀的横剖面简图

2 工作情况

为了理解器件的工作情况，见图2中的理想光阀基片的等效电路。在这个简图中二极管表示硫化镉/碲化镉异质结二极管，电容器表示介质反射镜的电容。图中所画的是在截止状态下，就是没有照明光输入到硫化镉光敏层上。如果交流电源接入这电路，电容器在第一周期将被充电到电源负峰值电压 $(-V_p)$ 。这电压将作为二极管上的反向偏压加到正弦变化着的电源电压的各数值上去。假设二极管的反向电阻无限大，在这个电路中的稳态电流将是零，而与频率，波形（假定为周期性的）和电源电压的幅值无关。这样，在理想的液晶光阀的无照明转换单元中根本没电流。

现在考虑在照明单元所发生的情况。在

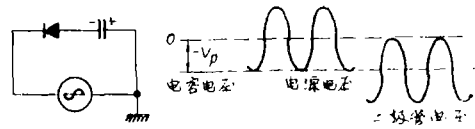


图2 在无输入照明时，理想光阀的等效电路和电压波形

使电路理想化的情况下（图3(a)），入射光子在二极管两端引入一个泄漏电阻，这电阻在二极管的反偏压周期中使电容器放电。图3(b)和图3(c)分别表示近似的波形。如果工作频率足够低，电流足够高，超过电光阈值时，液晶两端形成的电场将驱动被照明单元中的液晶。其结果用投影光束读出

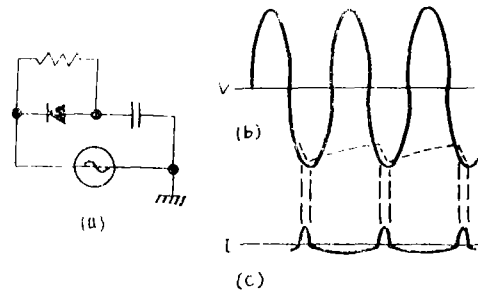


图3 有输入光照明时，理想光阀的等效电路和电流波形

图4是更加逼真的光阀等效电路。等效电路中的 R_1 和 c_1 分别表示液晶电阻和电容， c_2 是反射镜的电容， R_3 、 $R_3 + R_4$ 和 c_3 分别表示前置电阻，后置电阻和二极管的电容。在所用的这个电路中，我们假设反射镜的漏阻 R_2 很大也就是 $R_2 c_2 \omega \gg 1$ ，其中 ω 是电源的基频，所以我们能忽略电路中 R_2 的影响。与理想电路不同，图4中表示的基片不仅在光电导体被照明时有电流通过，在光电导体没被照明时也有电流通过。在这个电路中，照明降低 R_3 和 R_4 阻值，增加 C_3 容值（由于接合处光电容的作用）。结果照明单元的电流大于非照明单元的电流。这是用光电导体控制液晶光电效应所提供的电流差。所以用这种方法基片必须设计成满足下面条件，即没有照明单元中的电流低于液晶阀电流，有照

明单元中的电流高于激活液晶分子所要求的阈电流。一般的说，我们的目的是使这个电流比率最大，称这个比率叫器件的开关比，因为这比率决定液晶光阀的光电效率。

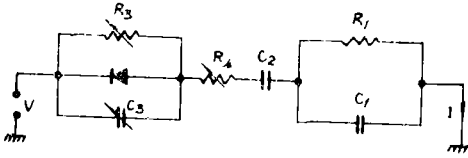


图4 实际液晶光阀的等效电路

III 液晶的研究—混合场效应

液晶光阀是一种多用途器件。改变用于器件的液晶种类及液晶在器件中的使用方式可实现不同功能。液晶所呈现的不同电光效应取决于液晶的特性和它的初始排列方式：动态散射，两种场效应—光双折射和光激活效应（扭曲向列效应）。别处曾论述过，由于种种原因，所有这些效应都不能单独地直接用于阀。为了得出下面介绍的特性，已经研究过混合场的方式，即在截止态（没加电压）用普遍扭曲向列效应和导通态（加电压）用液晶的纯光学双折射效应。

为了实现混合电光效应，在扭转排列结构中构成液晶层；电极处的液晶分子长轴平行于电极表面长轴排列（均匀排列）。除此之外，分子沿着进入设备构成器件予先选定的方向互相平行排列。扭转排列结构由定向的两个电极获得，以便在两个电极表面上的液晶排列方向成锐角（或直角），其结果如图5表示那样，成 45° 角扭转，大量液晶层中的分子在通过电极间的空间时转过这个角。这扭转排列结构与液晶的固有光学双折射结合使线偏振入射光的偏振方向准确地按着扭转角旋转。这就是所谓的扭转向列效应。在一般的扭转向列器件中，扭转角是 90° 。这里所讨论的器件是使分子旋转 45° 角，如下所述。

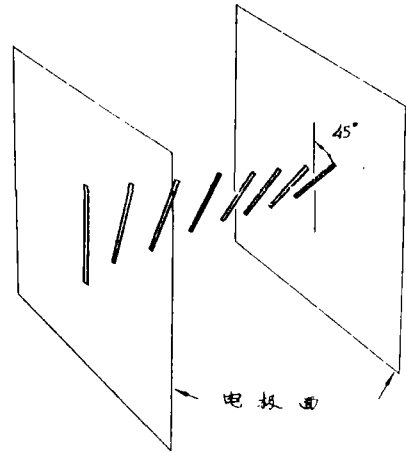


图5 45° 扭转向列液晶排列的简图（混合场效应模型）

为了了解混合效应模型的工作原理，首先考虑截止态，如图6(a)所示，我们在光阀和读出光源之间放一对横向的起偏器和检偏器。起偏器放在平行于第一个电极入射光束中，检偏器放在反射光束中。由于入射的线偏振光第一次通过液晶之后，偏振方向转过 45° ，这就造成了一个暗的截止态。而经介质反射镜反射的光第二次通过液晶后，偏振方向转回到入射光的方向，被横向检偏器截止。因此器件的截止态完全由扭转向列效应来决定。

导通态是很复杂的。如果加电压并旋转正介质各向异性分子成正交排列，光的偏振将不受液晶的影响，也可得到一个暗的导通态。这是没有意义的。进一步研究这个过程表明，由于分子无扭转，在完全截止和全导通之间，器件什么地方有电压，什么地方就有光通过横向检偏器。当电压加在液晶上时，分子开始转向正交排列（见图6(b)）。在平行和垂直之间取向的分子中分子的光学双折射能影响光的偏振。结果在这些中间电压值，从反射镜反射后由器件出射的光不再是线偏振光，所以能出现一些透射光。问题是能够透多少光？为了回答这个问题，我们把分子的方向看成是在器件上加有电压时液晶层上位置的函数。图7表示在扭

转排列构结器件中，分子的扭转角和倾斜角是其在液晶层内位置的函数。如图7(a)所示，电压的作用是消除螺旋线扭转。在理想的情况下，加有电压时，层中的一半分子取与一个电极有关的优先排列方向，另一半分子取与另一电极有关的排列方向。

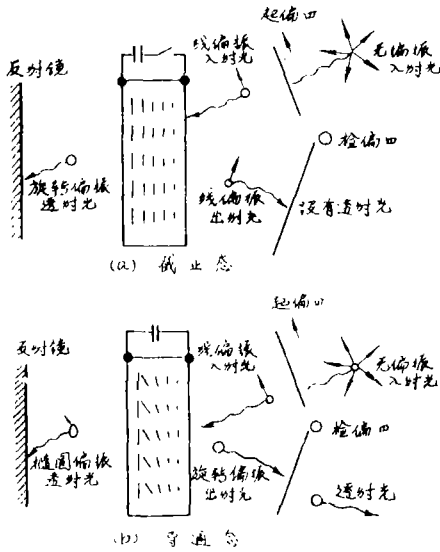


图6 混合场效应式光阀，a)截止态
b)导通态

在实际使用电压下，扭转向列器件的实际扭转角分布接近理想分布。该状态的物理解释如下，在液晶中，分子的扭转借助于液晶固有的长距离内分子间排列成行的能力来逐层传递。一般来说，由于分子倾斜角增加（朝正交方向），扭转的逐层传递效果不太明显。如果任何层的分子与电极正交排列，那么该层扭转传递率变成零。这就造成把整个螺旋线扭转分成两独立部分的后果。当这种情况发生时，分子迅速按照最近电极确定的方向排列。在旋转中便产生了一个接近理想分布的扭转角分布(图7(a))。上述是扭转结构的性质。下面介绍电压对实际器件扭转的影响。

倾斜角 θ 是元件厚度的函数(图7(b))，接近电极的倾斜角是很小的，而在中间液晶层的斜角最大，因为中间层的分子排列受电极的影响最小。对扭曲阈电压，元件中心的倾斜角总是 80° 。因此液晶开关电压较低，

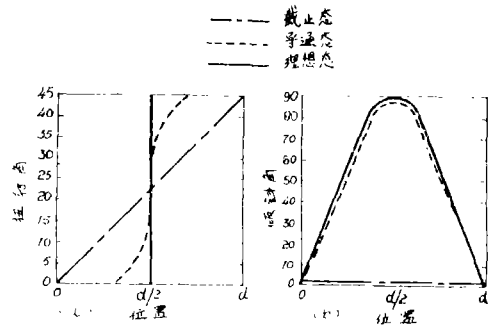


图7 分子取向计算值是其所在液晶层上位置的函数：(a)扭转角 (b)倾斜角

可迅速螺旋旋转，扭转角的分布接近理想分布(图7(a))。而且，在接近理想状态时，平均倾斜角是远小于 90° 。器件按下列方式利用该状态的双折射现象。

入射到器件的光偏振方向必须对准入射电极的预定排列方向，以便得到扭转向列截止态。这样当分子无扭转时，光的偏振应该与大多数液晶分子成 0° 或 90° ，纯偏振应该很小。很清楚，使双折射最大的办法是两个电极互相成 45° 角的预定方向来取向。以这种方式入射光的偏振使与液晶层的第二部分的非常光轴成 45° 角。这将使器件透射最佳化。

除混合场效应之外，光阀工作方式是两个纯双折射方式也是可能的。第一种方式分子排列垂直于电极表面，这种结构在本文的1-6一节中讨论。第二种方式是液晶分子均匀地平行于电极排列，光偏振的方向与排列的方向成 45° 角。每一个波长透射是电压的函数，这是典型的具有透射为零和平均高度透射峰值的双折射响应。实际上，这种工作方式不像混合场效应那样有吸引力，因为电压的数值和纯双折射效应透射峰值和零值位置对波长和液晶的厚度变化很敏感，从而，对给定液晶层厚度， 45° 扭转角情况的再次延迟是可能。

现在考虑三个不同可见光波长 45° 器件的实际特性曲线，如图8所示。液晶的厚度是 $2.2\mu m$ 。得到的曲线特点是低工作电压（有效值低于4伏），透射是电压的陡线性函

数，导通时具有高的透射（86%）。这些性质与快速响应时间和低截止透射相结合提供了液晶混合场效应光阀的独有的特点。用绿光读出使这特殊单元的厚度最佳化，这就是红光曲线有较高的截止态透射的原因。由于在截止时，产生横向偏振成份的残余双折效应，所以需要使液晶层的厚度最佳化。

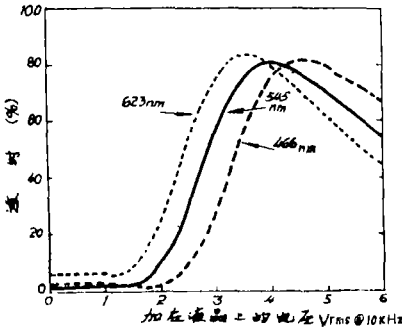


图8 透射是电压的函数，混合场效应模型的液晶厚度是 $2.2\mu\text{m}$ 。三条曲线分别表示蓝、绿和红三个不同波长。

IV 器件性能

这部分专介绍用于光学数据处理的液晶光阀的性能，参数是：

感光度

调制传递函数和分辨率

线性

信噪比

响应时间

光学均匀性和图象质量

详细介绍这些参数的实验系统和条件。

图9表示一般用途的相干光学实验台装置。另外还要介绍各种参数的互相作用，如调制传递函数和线性，响应时间和成象光能量。

1 感光度

在若干不同的条件下，用与图9相似的已经测量过液晶光阀的感光度。Gara得到典型的结果，图10给出波长 632.8nm 光阀的读出对比度比率大于 $100:1$ 的结果。在这种情况下，光阀接近饱和和有小于 $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的输入光功率，还有Casasent曾提出

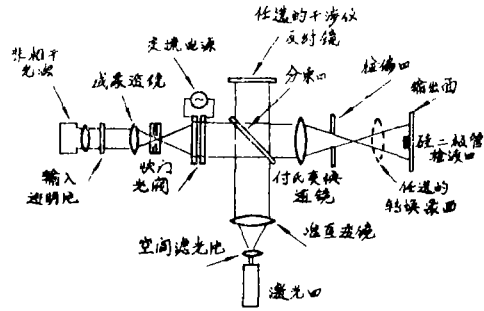


图9 一般用途的相干光学实验装置简图

报告，在通光孔的小面积内，得到很高功率。图11表示光阀直径为3毫米的感光曲线。其对比度比率是 $1500:1$ ，测试的动态范围 $30000:1$ Casasent 注意到液晶层上电场的局部变化限制整个孔上测量的对比度比率。

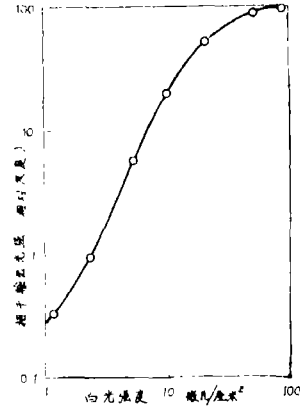


图10 1平方吋口径的液晶光阀上的感光度曲线。液晶厚度是2.6微米。

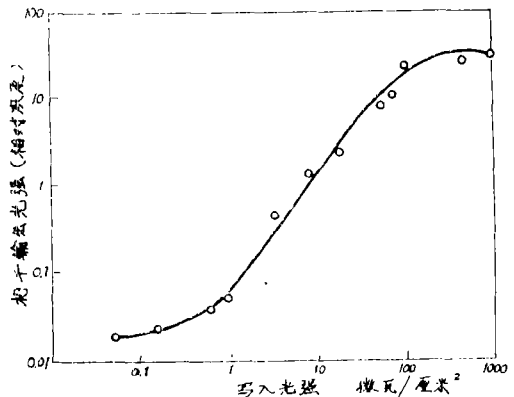


图11 直径为3毫米光阀的感光度曲线

2 调制传递函数、分辨率、线性和信噪比

这部分介绍极限分辨率，调制传递函数、线性和信噪比四个参数的测量。上述光阀的所有物理参数大部分都取决于器件工作的实验参数。最重要的是写入光强和读出光的单色性，准直性和偏振性。另外还有偏振光束中偏压的大小和频率以及器件的取向对相干空间光调制的应用是很关键的。在下述的实验中选择的实验参数，同时使光阀各种性能最佳化。为了测量调制度和分辨率，用泰曼—格林干涉计在光阀的输入中建立正弦波空间调制。图12是系统的简图。由消应力分束器得到两个平面波的干涉图投影到光阀的前面，用的是波长为514.5nm的扩束的单膜氩离子激光器。空间正弦调制函数的频率由泰曼—格林干涉仪一个俯仰反射镜来控制。用纤维光学检测器先扫描输入调制传递正弦函数，调制传递函数由下式计算：

$$M(f_{\text{输入}}) = \frac{I_{\text{极大}} - I_{\text{极小}}}{I_{\text{极大}} + I_{\text{极小}}} \dots\dots(1)$$

这些结果也考虑到测量系统的调制传递函数。

液晶光阀的传递函数用两种不同方法测量：(a) 在付立叶变换面 (b) 在象面。在两种情况中，上述正弦调制作为两种情况下光阀的输入。其结果表示两种测量的不同方面。读出光是波长为514.5nm 氩离子连续激光器的另一部分扩束平面波，如图12所示

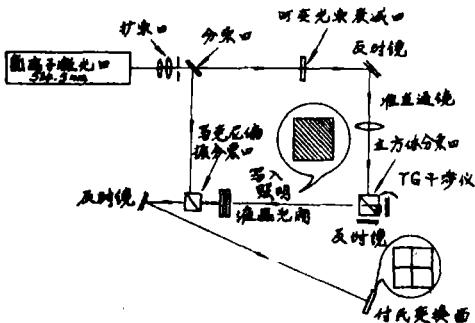


图12 用TG干涉仪的调制传递函数光学实验装置

a. 付立叶变换面测量：用频率为10千赫兹电压（有效值5.4伏）为器件加偏压使线性响应最佳化。在付立叶变换中调节写入光的平均强度使高阶付立叶变换最小（低于1%谐波畸变），得到硫化镉光敏电阻的较高激发光平。在典型的实验中激发光平均约150微瓦/厘米²。观察正弦调制函数的付立叶变换光点的强度作为空间频率的函数。特别注意使用光电倍增管阴极的相同激发区。

5线对/毫米的信号较背景噪声强35dB。付立叶面中检测的背景大部分是从非偏振散射得到的结果，这是由于器件的缺陷和不完善所致。大部分噪音发生在零空间频率。具有代表性的噪音强度是空间频率的函数，如图13所示。

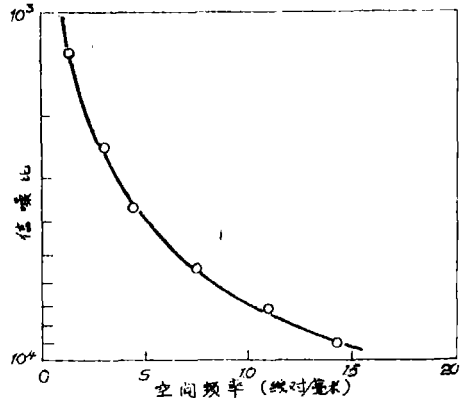


图13 在付立叶变换面中信噪比是空间频率的函数。在测量中包括系统噪音。

检测了噪声的快速下降并将较高空间频率时的信噪比改进提高到器件的上限分辨率。用比较第一级和第二级信号强度来监视光阀响应的线性。在5线对/毫米，第二级20—3dB的衰减基本能维持线性。

第一级衍射区域的强度在上述的条件下是空间频率的函数（图14）。曲线在零空间频率被标准化了。在一平方吋的面积上平均18线对/毫米得到50%调制。极限分辨率基本上在45—50线对/毫米左右，这为在付立叶变换面中光阀的工作提供较宽的可达到的频率范围。

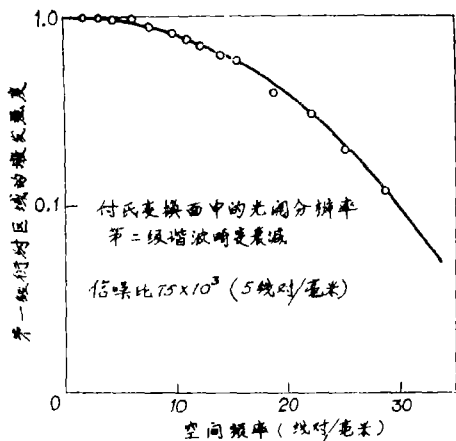


图14 第一级衍射区域的相对强度是空间频率的函数。零空间频率强度被标准化。在测量中用1平方吋的光栅。第二级衍射区域强度在所有的频率都小于第一级的1%。读出波长=514.5nm。

b. 像面测量：用准直的平面波，光阀的调制传递函数用纤维光学检测器监视。扫描光阀口径上0.5毫米的距离，调制传递函数 $M(out.f)$ 用上面确定的关系来计算（见方程(1)）。由输出和输入调制函数的比率得到器件的实际调制传递函数：

$$M(f) = \frac{M(\text{输出}f)}{M(\text{输入}f)}$$

此式消去了在实验系统中几个光学元件造成的调制传递函数的减低。图15给出 $M(f)$ 的曲线。在这测量中，谐波畸变低于1%。得到光阀分辨率的重要改进。标准的50%调制传递函数的分辨率为33线对/毫米，所以光阀以高通滤波器形式工作，而且上限分辨率在很大程度上取决于实验条件。在近乎零空间频调制传递函数的第一次减低可以认为是由于局部的不均匀性引起光阀电场分布的宏观变化所造成的。分辨率的上限由多层介质反射镜的光学质量以及激活区的纵横

阻抗比来确定。后面的分布将在很大程度上取决于偏压的频率。

为了用图来表示分辨能力，图16中是从光阀发出并拍照的空军用鉴别率板。图16

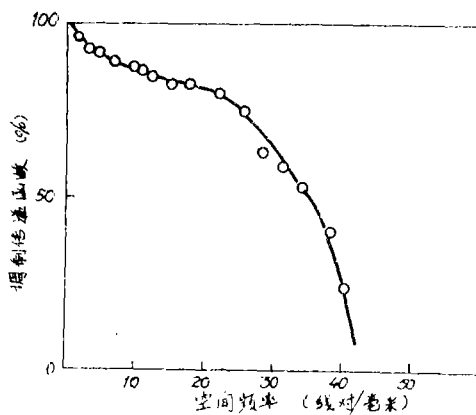


图15 像面测量的光阀的调制传递函数。扫描的孔径为0.5毫米而获得的数据。读出波长为514.5nm

(a) 表示非相干光成像的对比度和全部锐度的均匀性。图16(b)表示鉴别率板中心部分的放大视图。表示的分辨极限是40—50线对/毫米。

上面的数据是当前液晶光阀用于光学数据处理的代表性数据。以前报导的最好结果是30线对/毫米（具有1%的谐波畸变，调制传递函数为50%）。已经测量到在调制传递函数为50%时，超过40线对/毫米的分辨率。现还不清楚这些数据能否反映出光阀特殊的性能以及是否为最好测量技术水平。研究测量技术和光阀工作条件变化对调制传递函数影响的工作正在进行。其结果将在以后报导。

3 响应时间

光阀的响应前沿和后沿时间是器件几个参数的复合函数，具体地说，输入成象光强、脉冲宽度、交流驱动频率和电压偏差都

直接影响观测的响应时间。一般说来，这复杂性是由已知的硫化镉光敏传感响应特点决定的，液晶响应也包括在内。为了得到快速响应，光阀中所用的液晶薄层厚度为2—3微米。对单独液晶给出7毫秒前沿时间（0—90%），12毫秒后沿时间（100—10%）。图17是典型光阀在宽范围成象光强所观测的响应时间。在光阀的输出象面中用525毫微米的光（半宽度最大值一半为20毫微米）做测量。用硅光二极管作检测器。随着成象光强的增强（10—800微瓦/厘米²）前沿时间降低（200—20毫秒），在同样强度范围内，后沿时间40毫秒—20毫秒。

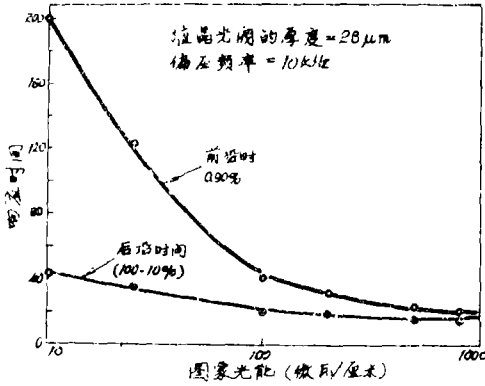


图17 液晶光阀的瞬时响应是对整个对比度所测的成象光强的函数。测量的前沿时间达均衡值的90%。后沿时间到暗态值的10%。液晶厚度是2.8微米。

用均匀的输入偏置光激励（成像光除外）可降低低光平前沿时间，这时间是由硫化镉中收集电子所决定的。这些结果由图18表示。由 Joseph 和 Gara 观测到前沿时间明显的降低。这些条件的综合结果是在减少输出图象对比度时可能造成电流开关比的降低。

已经研究了缩短光阀的响应时间和高强度输入光脉冲（氩离子激光器—514.5毫微米线）。初步测量表明，在脉冲宽度低于20毫微秒时，不损害光阀响应的可逆性，在光电导体硫化镉以积分器形式工作的情况下，此脉冲宽度完全取决于所积分的成象光通量。

4 光学平直度

相干输出波前的空间相位变化能由光阀的介质反射镜表面的不平度引起。为了测量表面的畸变，在图9所表示的光学台上麦克尔逊干涉仪一臂使用了光阀，另一臂使用 $\lambda/10$ 参考反射镜。而后观测系统的输出面

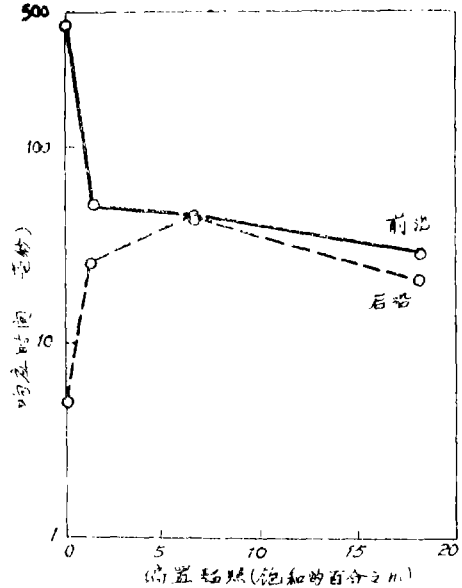


图18 输入的均匀偏置光对光阀前沿时间和后沿时的影响。

和记录光学干涉图形。

得到最好的结果表示在整个口径上弯曲的峰—峰值为 $\lambda/4$ 。典型的器件一般都好于 $3\lambda/4$ 。这是继续研究光阀的一个重要方面，希望得到进一步改进

5 图象质量

图19表示光阀生产高质量相干灰度图象

的可能性。图 19(a) 表示航空摄影的再现图象。光阀中的均匀性和细节是很清楚的。图 19(b) 表示直接成象在光阀上的三维目标(电机继电器)的再现图象。在下一部分($V-1$)介绍这目标的光学数据处理(ODP)研究。光阀精确地再现色调性质的能力在光阀的许多应用中是很关键的因素。

6 结 语

表 1 给出混合场效应液晶光阀中测量的规格和典型性能指标。如上所述光阀的性能与工作参数有很大关系,特别是成象光能量。

表 1 中表示的水平是成象光强度为 150 微瓦/厘米²的具体数值。一般说来,光阀的结构(液晶的厚度和排列方式)和工作参数(偏压、频率以及光阀的方向对输出光偏振的方向)对特殊的应用可以最佳化。在要求的条件下,器件的重现特征在满足系统广泛应用方面,灵活性是很重要的。

表 1 混合场液晶光阀的规格和典型性能指标

偏压范围	5—15V (均方根值)
交流频率范围	10 ² —10 ⁵ 赫兹
最大清晰口径	46毫米
成象光强(525 毫米)	150微瓦/厘米 ²
空间频率(有小于 1% 谐波畸变)	>15线对/毫米
调制传递函数是 50% (不规定线性)	>30线对/毫米
极限分辨率(空军用鉴别率板)	>40线对/毫米
响应时间前沿(-90%)	40毫秒
(对整个对比度)后沿(100-10%)	30毫秒
对比度比率(对一种波长)	>100:1

(上接 56 页)

design and manufacture2; Design (1)N78-13878/1GA.

(60) 光学薄膜: 理论, 设计及制造 2, 设计(2)

付立叶面中的信噪比 (空间频率>5线对/毫米) >35dB
 光学平直度(峰-峰畸变) >3λ/4
 对整个对比度的激发能量 60尔格/厘米²

V 在相干光学数据处理中的应用

液晶光阀已经广泛地用于光学数据处理。到现在为止大部是应用于非相干到相干图象转换。这器件还用于付立叶面中的实时空间滤光、图象对比的反转,非线性处理和数字光学处理的“双折射反射镜”。另外光阀还可用于两刃增强和已经介绍过的超低光平成象。这部分我们评论液晶光阀的应用。

1 实时光学相关

在实时光学相关器中 Gara 已经用光阀作为非相干到相干的图象转换器来确定稳态高对比度的三维目标的方向和位置。该系统已被推广用来实时地识别和跟踪运动的三维目标。这些目标用白光照明并用一镜头直接成象在光阀上。见图 19(b)。

光学相关用图 20 表示的装置来完成。这装置基本上是 Lugt 首先介绍的匹配滤光片结构。当目标成象在图象转换器上时,辅助反射镜的相干参考光用来记录目标的付立叶变换全息图。然后全息图作为目标的匹配滤光片,在输出面上检出带有自相关和互相关信号的目标。

对于静态目标,用光导摄像机记录输出,用电视显示含有光强截面的相关信号。图 19(b) 表示了静态目标(电机继电器)。目标沿垂直于光轴平移和绕平行于光轴的轴旋

Optical thin films; Their theory design and manufacture2; Design (2)N78-13879/9GA.

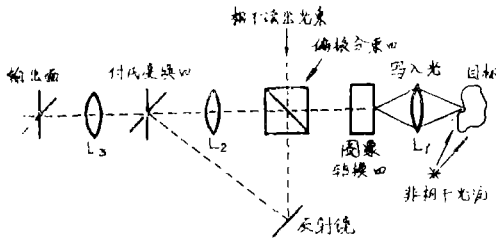


图20 记录匹配滤光片和得到相关输出的光学系统图。用液晶光阀上的象在摄影乳胶上记录匹配滤光片作为目标的滤光片

转的自相关得到极好的结果(图21和图22)。用来抑制其他背景而检出同类目标的互相关实验也很成功。

这些实验证明了第一个报导的三维目标的实时相关。这些结果清楚地论证了光学相关在实际应用方面解决问题的能力。

2 雷达信号光学处理

由阿思派克斯磁带录象公司(Ampex Corp)为弹道导弹防御发展技术中心(BMDATC)所建的雷达信号光学处理器中,液晶光阀用于光学脉冲压缩器和距离/多普勒二维处理器。整个系统所设计的带宽为150兆赫。表2给出全部设计指标。由于这个系统仍然在建造的情况下(希望在1978年9月完成),仅初步结果是可用的。后面着重介绍该系统在实时光学数据处理中液晶光阀所起的作用。

表2 BMDATC 雷达信号光学处理器的设计指标

TBS 产品	270,000
带宽	150 兆赫兹
响应时间	7 毫微秒
时间单元	900
多普勒分辨率	530 赫兹
多普勒单元	300
参考变化速率	30/秒

图23是系统的方框图。天线接受的信号通过接收器和某些附加电路信号与脉冲压缩

器可接收的频率相混合。使用光阀的光学处理器压缩脉冲并由光电二极管转换成电信号输出。压缩脉冲馈给光学多布勒处理器。由包括距离和多布勒信息的处理器的输出进入各种显示单元和小型计算系统。显示单元由距离/多布勒二维显示、距离/多布勒三维显示和能详细显示选择信号的距离或多布勒信息的阴极射线管组成。计算系统由带有一般外围设备的小型计算机组成。

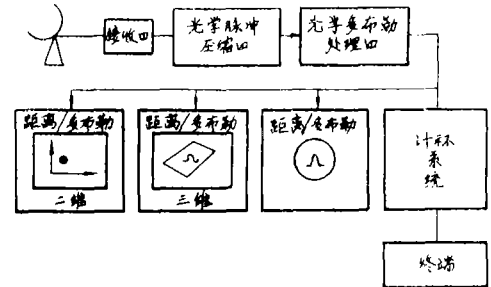


图23 BMDATC 雷达信号光学处理器

光学脉冲压缩器或相关器由图24表示。输入信号馈给用准直的氩离子激光束照明的Bragg元件。第一对透镜把声波束成象在液晶阀的读出表面。第一个透镜在光阀处形成一个付立叶变换。这光阀仅通过单边带信号(第一级)。由CRT系统把一个信号匹配掩模板写在光阀的另一边。由一个小型计算机产生的信号控制CRT的强度与任何将要压缩的雷达波形匹配。也还有适当的校正设备以补偿成像系统中的各种光学畸变和CRT扫描误差。

近来的雷达信号与液晶上参考掩模相关。采用光学付立叶变换和在零空间频率定位光电二极管完成积分。光电二极管输出被放大并馈给光学多布勒处理器。设计的处理增益或脉冲压缩器的时间带宽(TBW)是900(6微秒和150兆赫)。

很显像线性调频脉冲这样简单的波形,柱透镜能用来作为匹配滤光器不要求CRT和光阀。图25表示一个有载波的压缩脉冲,用图24系统试验装置压缩载波,用10年的旧

CRT扫描器和实验室仪器产生CRT驱动波形。

在图26中,以图解的方式说明光学多布勒处理器。它的原理是用一个垂直偏转的声光偏折器将声波的 *Schlieren* 图象选通(记录)到液晶写入面。液晶的读出面,用准直的连续波氩离子激光器照明。垂直方向的变换和水平方向的图象在输出面产生距离/多布勒(二重性函数)。图27(a)和图27(b)表示阴极射线管靶面和处理大多布勒频移的输出。注意图27(b)标记(底)和信号(顶)之间分开。倒腔锁膜氩离子激光器为光阀上的写入提供光源。激光束被滤光和扩束去照明输入声光元件。

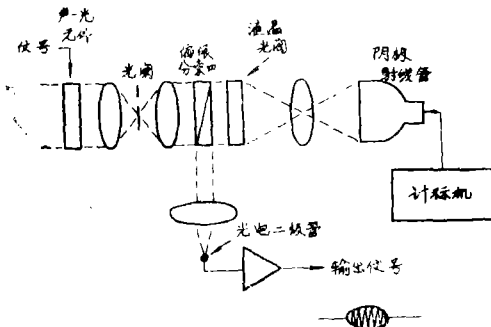


图21 BMD-1TC 光学相关器 (脉冲压缩器)

因设计的写入面要求记录300条线,所以多布勒处理器的处理增益也应是 $300 (2^3 \text{ dB})$,合成的系统增益是 2.7×10^5 。

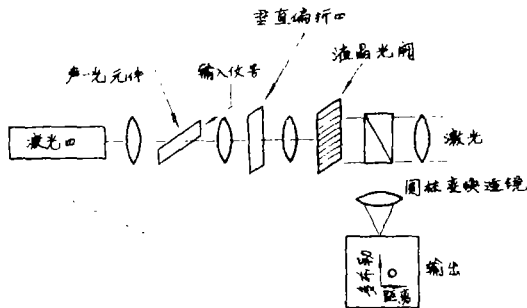


图26 BMD-1C 光学多布勒处理器

3 图象增强管和液晶光阀器件

与液晶光阀直接耦合的单通道象增强管的实用性已经得到证明。增强管具有将低光平景物放大使之达到光阀所要求的输入光平

的能力。因此,这种结合不需附加照明即可进行实际景物的光学数据处理,即使在景物的照明条件极差的情况也是如此。此外,这些景物可不用电子像机而是通过一个镜头直接呈现在光学数据处理系统上。

在实验室中,一个近焦通道增强管(带有纤维光学输出窗口)耦合到一个光阀(带有纤维光学输入基片),演示了混合象增强光阀。图28是与投影读出系统合成一体的复合器件简图。低光平的输入图象聚焦在增强器的光阴极上。这样产生的光电子被加速到微通道板,在板内引起二次电子发射。这些二次电子也被加速到荧光屏。被增强50,000倍的图象通过双纤维光学板传到光阀的光敏层(通过纤维光学板这样的传输亮度衰减40%—50%)。光阀将输入图象转换为液晶复制的电子光学图象。

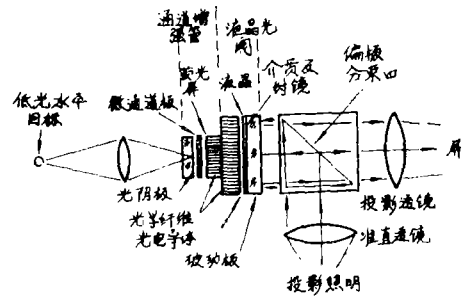


图28 组合式光阀图象增强系统的简图

为了把调制度表征为组合器件的空间频率的函数,用 *Sayce* 鉴别率板透明片来测量,它为通道增强管的光阴极提供连续变化的空间频率线图的输入。实验中所用图象的亮度是 3×10^{-3} 呎一烛光。增强管使图象增强 10^3 倍宽度达3呎一烛光。光学系统的极限空间频率响应测量得30线对/毫米。图29表示通道增强和光阀的调制传递函数曲线,也表示单一的典型纤维光学输入光阀的调制曲线(用 *Sayce* 板测量)和带有纤维光输出的典型的通道增强器的实际调制传递函数曲线。由此可见,组合器件(象增强器加光阀)在较低的频率情况下比单独图象增强有

较高的调制度。这是因为组合器件的曲线是用 Sayce 图形的方形刃边线得到的。而图象增强器的传递函数由正弦形曲线得到的。

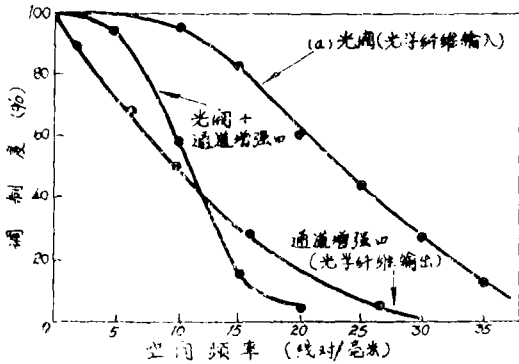


图29 通道增强器、光阀和两个元件结合的调制传递函数。

这些实验所用的通道增强管是由于这种型号管子的实用性所决定的。这些实验用图解的方式证明了用这管的输出驱动光阀的能力。这些实验更重要的意义是不仅通道增强器能驱动光阀，而且所有相关成像器件都能驱动光阀。这种器件有很好的特性，就是新图象输入分系统整个光谱对液晶光阀都可响应。比较图30和图31中其他类型增强器曲线。图30表示有纤维光学输出窗口的各种型号管子的调制传递函数。这些曲线表示为了增大分辨率，与其用高增通道增强管或三级静电增强器，倒不如用低增益的二极管更为有益。已有人将高分辨率微通道板与磁聚焦管组合起来并已报导极限分辨率为45线对/毫米。由于用较高输出级电压，这些设备可能有较高输出亮度极限。

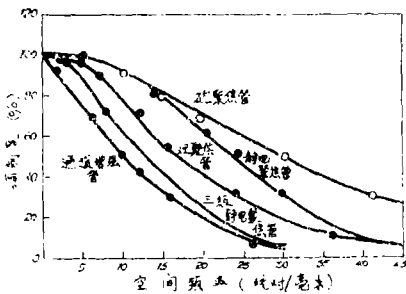


图30 各种管子的调制传递函数

最后在图31中，介绍各种型号管子的典型输入光平工作范围和它的典型输出光平。图中也表示出光阀的输入，光平工作范围，从图中还可以看到，光阀的输入要求和增强管的输出光平之间有极好的一致性。光阀上的投影光强是1000到2000流明。通道增强器和光阀结合系统有9—10个数量级的光增益能力。

图31中也包括图象贮存管的特性曲线，它有接收低亮度图象，无限贮存图象和按照指令在荧光屏上显示贮存图象的性能，用这管可以对光学图象进行积分，相减和为便于以后读出而贮存。贮存一个图象，可用乘除和相关的方法来读出。贮存器件的周期是1到3分钟。

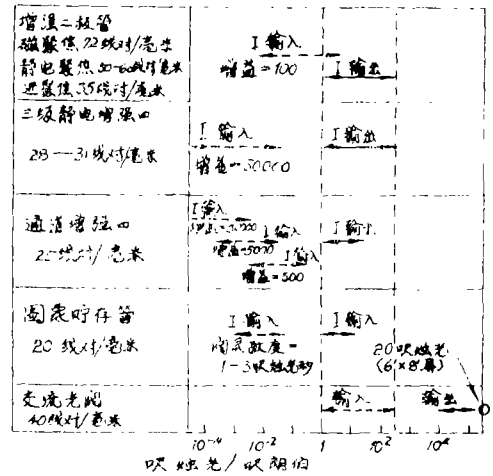


图31 各种管子类型和光阀的一致性

4 数字光学数据处理机

Collins 已经介绍过光学方法进行算数运算的新应用。他的探讨方法是用质数留数表示和以纯双折射方式工作的光阀（看IV），液晶按照无扭转要求以垂直取向或均匀的结排列。用光阀中的调制去控制偏振光点，这光点是表示数字的相位编码。质数留数表示法可容易进行运算操作。图32是该系统的简图。液晶光阀的右边用（汞弧灯照明）单色光束照明并且用光阀延迟控制读出光，在

进入空间阵列检测器之前，光束将被返回到光阀里多次。光阀的写入一边（左边）用阴极射线管光照明，阴极射线管的空间强度分布由阴极射线管驱动器控制。数字信息进入微处理器，微处理器将数字信息编码，使之成为与光阀适应的表示方式。并且微处理器以一般格式用于阴极射线管驱动器。输入信息控制光阀调制右边光束，以使用光阀光束作为计算机贮存元件达到所要求的算数运算。解码后，在检测器阵列上运算结果是有用的。原则上光阀使一束光受控，对进出液晶层的逐次反射光束给以增加相位延迟。

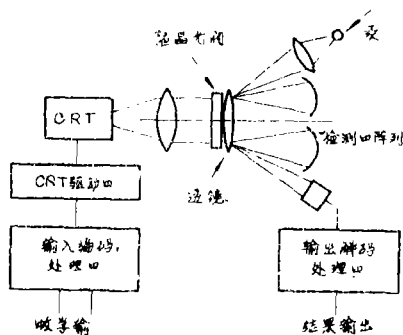


图32 数字光学处理系统的简图

5 实时相干光学边缘增强

Lewis 在论证相干高通光学滤光系统实时光学边缘增强时介绍过光液晶光阀的用途。他的研究是受到机器视觉用于检验和自动装配的启发，在那些地方需要减少必须进行数字分析的图样数据的数量。以前曾使用的高通滤波技术是观测中心暗区方法，这方法用来获得目标相位的信息。二维高通滤光片提供独立的刃边方向，并且在不用极复杂系统的情况下可以使用光学噪音相减的方法。所观测的非相干目标有7周/毫米的空间截止频率。

用图 19(b) 中的电机继电器作为输入目标，图33表示处理器增强输出的边缘。用低光平电视相机检测处理器的输出，把摄像管的靶面定位与滤波象面一致。数字化的输出是256×256象元和32个电视光平。

为了比较，图33还示出一个已做数字边缘增强的目标计算机图形显示。在光学处理器系统中用同样的电视摄像机来检测非相干光照明的目标。可以看到以光学手段得到的结果和数字边缘增强结果具有相同的质量。光学技术明显优点是处理时间小于100毫秒，而数字技术处理时间是4秒。

6 实时光学图象相减

Grinberg 和 Marom 曾提出过能实时处理两个非相干照明物并产生信息相减的信号的方案。该方案使用两个液晶光阀，在液晶光阀上投影两个相减的图象。一个光阀在横偏振器中检偏，而另一个光阀在纵偏振器中检偏，两个偏振器用偏振分束器和 $\frac{1}{4}$ 波片来实现的。见图34，在公共输出像面两个图象迭加并显示的光强与两个输入间的差成正比。因此，该光强迭加在恒定的背景光强上，显示了差别信号以及它的极性。读入和读出光束可是相干的和非相干的。由于非相干光产生无斑点图象，所以后者更合乎需要。

在这些实验中，液晶层是垂直于光阀电极表面排列的，这与混合场效应中的扭转向列排列结构不同。这种情况下，液晶分子的光轴近于垂直于器件的电极（垂直取向排列），所以在截止状态，没有相位延迟出现，并且横偏振器封闭屏上的投影光。随着成像光入射到光导体上，一个超过液晶光阀阈值的电压被加在液晶层上。由于选择的液晶有负介质各向异性即 $\epsilon_{\parallel} > \epsilon_{\perp}$ ，所以它的分子排列倾向垂直所用电场。因此，所加的电压（与输入的成像光空间光强的变化成正比）将分子转离它平行所加电场的初始状态，并在寻常光与非寻常光之间产生一相位延迟。这相位延迟改变投影光的偏振。如果液晶层足够薄，延迟就很小。因而弥散的影响也很小，实验结果由图53表示。

图 35(a) 和 (b) 一个线性图形的两个透明片作为两个输。第一个放到输入2的位置，显现出互补方式的输出（图 35(c)），而

VI 结 论

这里我们已经介绍了液晶光阀和它在实时相干光学数据处理方面的应用。因为设计的多用性和可达到的高性能，液晶光阀已成为重要的器件，围绕着光阀已经发展了各种用于投影显示和光学数据处理 (ODP) 的系统。

根据投影显示设备的强烈要求，这些器件正进入样机生产阶段。这对不断增加光阀在光学数据处理方面的应用是很重要的，这将有效的减少器件的费用而增加器件的利用率。

光学数据处理光阀的重点是改进光学质量平直度，响应的均匀性和调制传递函数。此外，用户的意见必将用到更富有成果的研究中去 (注本文的照片删掉，请看原文)

译自 "Optical Engineering" Vol,
17, No. 4, P371, 1978.

(吴柱英 译 张宪英 董玉芝 校)

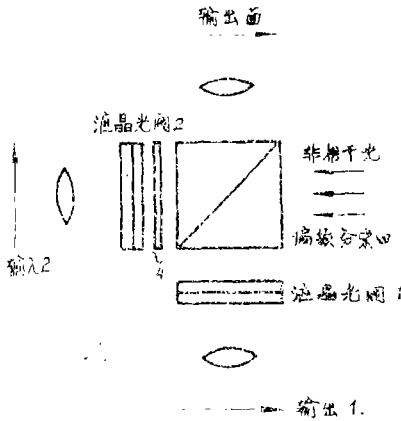


图34 在输出面上，垂直方式 (LCLV₁) 直互补方式 (LCLV₂) 图象同时重迭的装置

第二个按通常的正常方式结构放置 (图35(d))。它们的重迭提供相减显示 (图35(e))。

这个工作之所以重要是因为它仅有非相干光源得到实时图象相减的能力，及同时提供合成信号符号的能力。而所有其他相减方案都不能提供相减后的符号

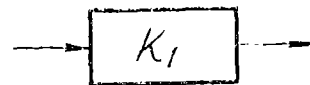
(上接3页)

$$\begin{aligned} &= \frac{K_1}{1 \pm K_1 \mp K_1} \\ &= K_1 \end{aligned}$$

图4系统和图5系统，表面看来不相同，但是，求出它们的传递函数都是：

$$K = K_1$$

这样，它们都和图6系统等效，即两个系统都可以简化为图6的简单系统。是一个放大倍数为 K_1 的放大器。



(图6)

从这几个简单例题可以看出，用公式 (3) 列写系统传递函数是很方便的。而且，系统越复杂，就越显得简单，也很好记忆。实践证明，用本文所述公式求出的系统传递函数与用控制理论中基本方法所得结果是完全一致的。