

超线性液晶电光调制器及其应用

戴建华 张洪钧

(中国科学院物理研究所)

陈 传 娟

(中国科学院生物物理研究所)

提 要

本文介绍了双稳液晶电光调制器的超线性特性以及它在制作各类特殊振幅光栅和半色调屏上的应用。实验表明,这种方法失真小,方法简便。

一、引 言

光学双稳态装置是近年来十分引人注目的研究课题,除在理论研究上有重要意义外,在光学信息处理等领域有着潜在的应用。Feldman^[1]首先在电光晶体中观察到双稳态光学装置的超线性特性。本文以液晶为非线性介质,利用液晶场致双折射效应引起的透过率 $T(V)$ 的非线性,观察到在电光反馈条件下,两种运用方式的光学双稳特性^[2],证实了在液晶组成的光学双稳装置中也有十分宽广的线性区域可供电光调制使用。本文着重于分析 $0^\circ/90^\circ$ 偏振状态下,液晶电光调制器的双稳特性,给出了几何模型。数值计算结果表明,当输入光强超过一定值后,输出光强与调制信号呈线性关系。所得实验结果与计算结果相符。利用超线性调制特性,可以制作各种形式的振幅光栅,并成为制作半色调屏的一种新方法。实验表明,利用这种超线性调制器可以方便地得到任意函数形式电信号的光强再现,完成动态范围宽的电光调制。因而预计它将在生物、医学、光学传递函数以及光学信息处理中得到广泛应用。

二、分 析

双稳液晶电光反馈调制器原理如图7所示。加在液晶盒上的电压是正比于输出光强 I_2 的反馈电压 KI_2 与固定偏压 V_B 之和,即

$$V = V_B + KI_2, \quad (1)$$

其中 K 为包括光电检测器和放大器在内的光电转换因子(单位为 V/mW)。

当液晶盒由 90° 扭曲向列液晶构成时,实验测得的在 $0^\circ/90^\circ$ 偏振状态下,调制器的透过率特性 $T(V)$ 如图1所示。定义电光调制器的透过率函数为

$$T(V) = I_2/I_1, \quad (2)$$

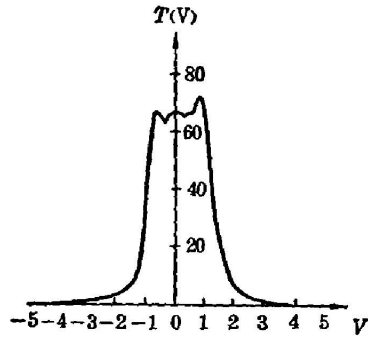


图1 90° 扭曲向列液晶盒在 0°/90° 偏振片的 $T(V)$
 Fig. 1 Transmission versus voltage for 90°
 twisted nematic liquid crystal at 0°/90°

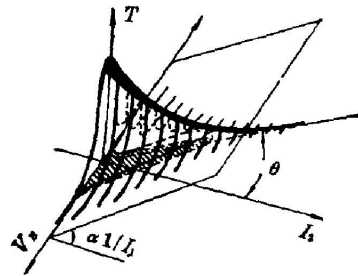


图2 $T-I_2-V_B$ 空间液晶的几何模型
 Fig. 2 The geometrical mode of
 the liquid crystal $T-I_2-V_B$ space

式中 I_1 为输入光强, I_2 为输出光强。

由 (1) 和 (2) 式可以解出电光调制器的传递函数 I_2-V_B 关系(当 I_1 作为参量固定时)。但是要用解析式来表示 $T(V)$ 有一定困难, 计算机对实验测得的 $T(V)$, 用指数函数进行回归拟合:

$$T(V) = \exp(a_2 V^2 + a_1 V + a_0), \quad (3)$$

式中 $a_0 = -0.911$, $a_1 = -0.056$, $a_2 = -0.243$ 。当考虑反馈系统后, (3) 式成为

$$T(I_2, V_B) = \exp[a_2 (V_B + K I_2)^2 + a_1 (V_B + K I_2) + a_0]. \quad (4)$$

如图 2 所示, 在 $T-I_2-V_B$ 空间, 透过率函数是一空间曲面, 此空间的坐标 V_B 代表偏压, 可以从负值至正值, 坐标 I_2 代表输出光强, 只有正值。可以看到, $I_2=0$ 的截面就是没有加电光反馈系统的液晶盒的透过率曲线。当加上电光反馈后, 对每一个 $I_2=$ 常数的截面, 其分布形式都是正态的, 但其幅值随 I_2 的增加亦以正态分布衰减; 此外, 正态分布的对称中心亦不再位于 $V_B=0$ 的 I_2 轴上, 而是以 $V_B + K I_2$ 的方式向 $-V_B$ 方向偏离, 并与 I_2 轴形成夹角 θ , 夹角 θ 正好是电光反馈系统的光电转换因子 K 。说明 θ 角的出现反映了反馈系统的作用, θ 角的大小表示反馈的强弱, θ 愈大, 反馈愈强。

现在考虑 I_1 作为参量固定时, (2) 式是 $T-I_2$ 平面中经过原点的直线方程, 其斜率为 $1/I_1$ 。此直线与 V_B 轴构成的平面与曲面 $T(I_2, V_B)$ 相截, 相截曲线在 I_2-V_B 平面中投影, 即为所求的调制器的传递函数 I_2-V_B 曲线, 如图 2 中阴影区域所示。不同 I_1 值, 相应于此平面绕 V_B 轴有不同倾角, 从而获得不同 I_2-V_B 投影曲线。因此, 图 2 给出了物理图象十分清楚的几何模型。

事实上, 当输入光强 I_1 作为参量固定时, 联立 (2) 和 (4) 式可以解出 I_2-V_B 关系

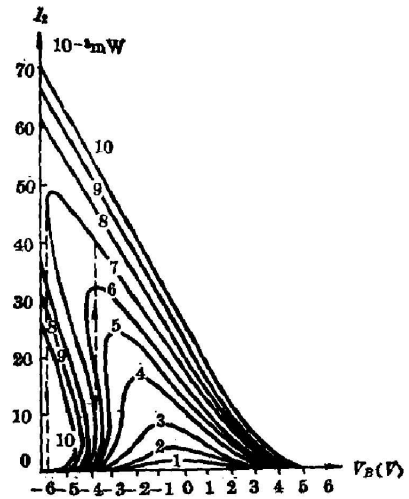


图3 液晶的 I_2-V_B 关系(计算结果)
 Fig. 3 Calculated plots of output
 intensity versus bias voltage for a
 number of input intensities

$$\Delta I_2/I_1 = \exp[a_2(V_B + KI_2)^2 + a_1(V_B + KI_2) + a_0]. \quad (5)$$

当输入光强 I_1 为各固定值时, I_2-V_B 关系经计算所得曲线如图 3 所示。其中曲线 1, 2, ..., 10 分别代表 I_1 的固定值依次为 0.005 mW, 0.010 mW, 0.020 mW, 0.040 mW, 0.060 mW, 0.080 mW, 0.100 mW, 0.200 mW, 0.300 mW, 0.500 mW 时的 I_2-V_B 关系。

从图 2 几何模型和图 3 计算结果表明:

(1) 当 I_1 大于某临界光强时 ($I_C > 0.04$ mW), I_2-V_B 出现双稳区, 同一个 V_B 值有两个输出光强。并且所处状态由滞后回线的进行方向决定(见图 3 中虚线与尖头)。

(2) 随着 I_1 的增长, 双稳区向 $-V_B$ 方向移动, 双稳区的宽度也愈益增宽, 同时, 曲线的上肢呈现线性区域。当 I_1 很大时, I_2-V_B 的线性区异常宽广被称为“超线性”^[1]。利用电光反馈调制器的这个特性, 可以做成超线性电光调制器。

(3) 光电转换因子 K 愈大, θ 角愈大, 则较小的 I_1 就能出现双稳区, 并且双稳区宽度也愈宽。说明反馈的强弱是影响双稳器件的参数。

三、实 验

1. I_2-V_B 实验曲线

实验装置见文献[2], 图 4(a) 和图 4(b) 分别为 $0^\circ/90^\circ$ 和 $-45^\circ/+45^\circ$ 偏振状态下, 液晶电光调制器的 I_2-V_B 关系的实验曲线。 V_B 变化范围选择在 $-6 \sim +6$ V。 I_1 是参量(以 mW 为单位)。从图 4 可以看到, I_2-V_B 之间的双稳区域, 随着 I_1 的增大也逐渐增大, 并向左移动, 当 I_1 增大到一定值后(对 $0^\circ/90^\circ$, $I_1 = 0.12$ mW; 对 $-45^\circ/+45^\circ$, $I_1 = 0.20$ mW), 在 V_B 的一个较大范围 ΔV 内, I_2-V_B 呈负斜率线性关系, 其线性范围较为宽广, 对 $0^\circ/90^\circ$, $\Delta V \sim 10.5$ V; 对 $-45^\circ/+45^\circ$, $\Delta V \sim 8$ V。两者相比, $0^\circ/90^\circ$ 偏振状态因其线性范围宽, 所需输入功率小, 因而更有利于作线性调制器。实验所得 I_2-V_B 曲线与理论计算结果相一致。

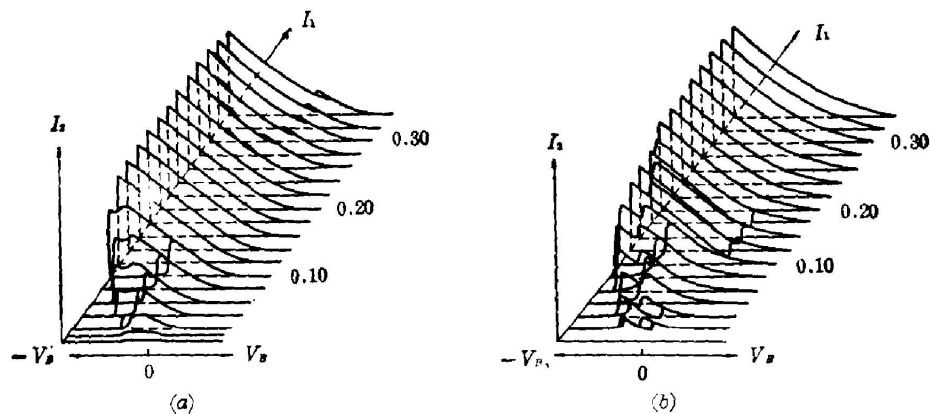


图 4 液晶的 I_2-V_B 关系(实验结果)

Fig. 4 Experimental plots of output intensity versus bias voltage for a number of input intensities

2. 液晶电光调制器的频率响应

在图 7 所示装置上, 由 XD8 超低频信号发生器提供正弦波信号作为输入电信号 V_B , 逐渐改变正弦波频率, 在 SBD6 型超低频示波器上观察输出光信号 I_2 的频率响应。定义 I_2 输出幅度降低到低频(例如 $f=0.01\text{c/s}$)时幅度的 0.707 倍, 所相应的频率即为液晶电光调制器的上限频率 f_c 。对两种厚度的液晶盒进行了测量, 厚度 10μ 的液晶盒, 其 $f_c=50\text{c/s}$; 厚度 14μ 的液晶盒, $f_c=10\text{c/s}$ 。应该指出的是光电检测器和放大器的频率响应均在 10kC 以上, 远大于 L_c 的上限频率。可见, 除液晶分子本身运动速度外, 液晶盒的厚度是影响液晶频率响应的因素。因此减小液晶盒的厚度将提高电光调制器的频率响应。

3. 液晶电光调制器的偏置问题

与一般电调制器一样, 液晶电光调制器也有直流偏置问题。如图 5 所示, 若 V_B 偏置在 B 点, 相应直流偏置电压为 V_{B0} , 与此对应有一直流光强偏置 I_0 , 即使输入电信号为零时, 调制器也有一个恒定的光强输出与之对应。另外可以定义电光调制器的“对比度”

$$\nu = [(I_0 + \Delta I) - (I_0 - \Delta I)] / [(I_0 + \Delta I) + (I_0 - \Delta I)] = \Delta I / I_0.$$

4. 液晶电光调制器对各种波形信号的调制结果

图 6 为相应于正弦、三角、锯齿、矩形、阶梯等电信号输入, 用 $x-y$ 记录仪记录的电光调制结果。从这些实验结果可以看出超线性调制器具有失真度小的特点。

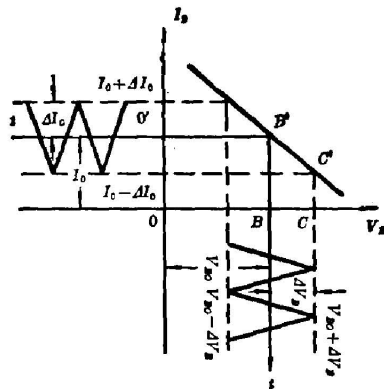


图 5 液晶电光调制器的偏置

Fig. 5 The bias of liquid crystal electro-optic modulator

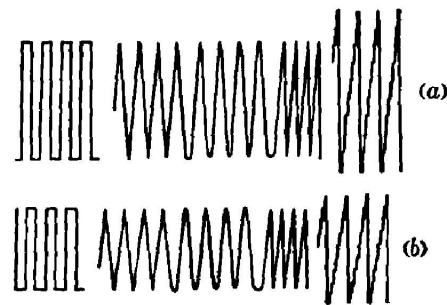


图 6 电光调制实验结果

(a) 电信号; (b) 光信号

Fig. 6 The experimental results of electro-optic modulation

(a) electrical signal; (b) optical signal

四、应 用

1. 制作各类振幅分布光栅

利用双稳液晶超线性电光调制器, 可以得到任意函数形式电信号的光强再现这个特点, 可制作多种特殊形状的振幅光栅, 其装置如图 7 所示。电光调制器输出光强 I_2' 由一对柱面镜 C 准直并照明狭缝 S , 再经透镜 L 成像在平面 PN 上, 狭缝像宽度为 10μ 。平面 PN 被固定在精密平动台上, 平动台由同步电动机带动(转速: 45r.p.m.), 按箭头所指方向平移。在平面 PN 上放置胶片以记录光强变化。由于电信号是周期变化的, 所以底板可记录下呈

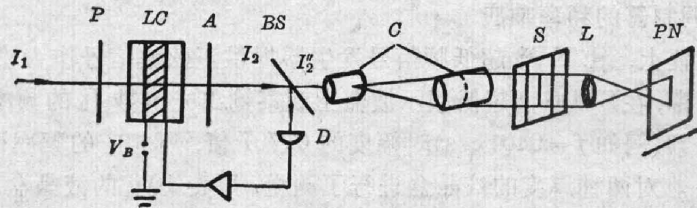


图7 制作各类振幅分布光栅的实验装置

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental set for making various special amplitude gratings

周期结构的光栅。光栅形状由输入电信号的形式决定。为得到高质量的光栅照片，要求平台位移要平稳，电动机转速要均匀，还要求液晶稳定性好。图8为所记录的矩形(a)，锯齿(b)以及正弦(c)光栅的放大照片。

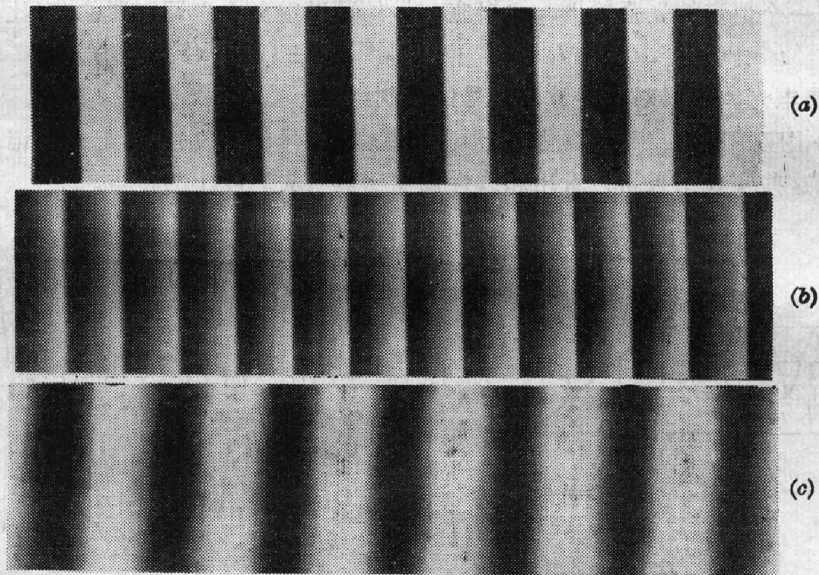


图8 各类振幅光栅的放大照片

Fig. 8 The photographs of various amplitude gratings

2. 半色调屏的制作

制作半色调屏的方法较多^[4,5]，但都不容易。本工作专门设计了超低频阶梯波信号发生器，它由十进制计数器、门电路和编码电路组成，周期可调。每个周期内有十个阶梯，其波形可见图4。图9为记录所得一维非对称半色调屏，每个周期内有10个密度等级。实验结果表明，它为制作半色调屏提供了一种简便可行的方法。

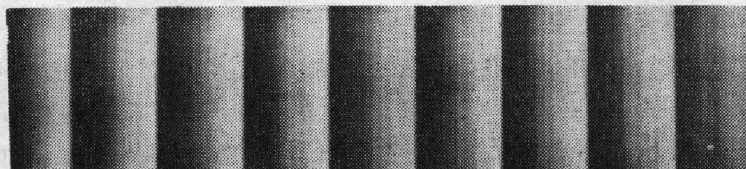


图9 一维非对称半色调屏放大照片

Fig. 9 The photograph of 1-D asymmetrical halftone screen

五、结 论

本文分析了 $0^\circ/90^\circ$ 偏振状态下电光反馈液晶调制器的双稳特性和超线性特性, 给出了几何模型。实验结果与计算分析相一致。通过两种偏振状态下线性宽度的比较, 认为 $0^\circ/90^\circ$ 偏振状态更适宜作超线性调制器。讨论了这种调制器的频率特性, 直流偏置, 以及利用各种波形电信号制作相应振幅光栅和半色调屏的实验结果。这些结果证实了超线性液晶电光调制器具有能对任意函数形式的电信号(例如 Walsh 函数、线性调频等电信号)光强再现的能力。因此预料这种工作电压低, 线性范围宽, 失真度小, 设备简单的电光调制器将在许多领域中获得应用。主要缺点是频率响应太低, 因此制作厚度很薄的液晶盒, 尤其是寻找快速响应液晶材料, 将是提高调制器频率响应的途径。

参 考 文 献

- [1] A. Feldman; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, No. 3 (Aug), 243.
- [2] 张洪钧等; 《物理学报》, 1981, **30**, No. 6 (Jun), 810.
- [3] H. K. Liu, J. W. Goodman; *Now. Rev. Optique*, 1976, **7**, No. 2 (Sep), 285.
- [4] H. K. Liu *et al.*; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 10 (Oct), 2394.
- [5] T. C. Strand; *Opt. Commun.*, 1975, **15**, No. 1 (Oct), 60.

Ultrilinear liquid crystal electro-optic modulator and its applications

DAI JIANHUA AND ZHANG HONGJUN

(*Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing*)

CHEN CHUANJUAN

(*Institute of Biophysics, Academia Sinica, Beijing*)

(Received 1 December 1981)

Abstract

The ultrilinear characteristics of a bistable liquid crystal electro-optic modulator and the use of it for making various special amplitude gratings and the halftone screen are introduced. The experiment shows that the advantage of this method is its small distortion and simple configuration.