

双稳液晶电光调制器

张洪钧 戴建华 杨君慧 高存秀

(中国科学院物理研究所)

1980年10月15日收到

提 要

本文介绍了一种新的液晶混合双稳光学装置(LCBOD),观察到了液晶BOD两种运用方式的光学双稳态。描述了液晶BOD在光学逻辑元件和超线性调制上的应用。还研究了液晶BOD的瞬态响应,观察到了“临界延迟”现象。测量了开关时间。实验结果与Garmire的理论相符。

一、引 言

自从1969年Seidel^[1]和Szöke^[2]提出放有饱和吸收介质的非线性Fabry-Perot标准具(以下简称F-P标准具)具有双稳特性后,这种双稳光学装置BOD(Bistable Optical Device)引起了人们的广泛兴趣。Bischofberger和Shen等还对Kerr介质^[3,4]的双稳特性进行了研究。这些系统需在强光(MW功率)下工作,介质的非线性是由光场本身引起的。1977年Smith^[5]在混合装置中也得到了光学双稳。在这种装置中采用了电光反馈,F-P标准具内电光晶体的非线性是由与输出光强成比例的反馈电压感生的。由于这种外加电场能在光学介质中造成一个较大的“人为非线性”,因而使得这种混合装置可以在弱光下工作,(功率可低至nW)。这种混合装置有利于集成化,有可能做成体积小、功耗低的器件。但是用非线性F-P标准具作为BOD仍需单模激光器作光源。同年年底Garmire^[6]指出,任何光开关,只要透过率特性 $T(V)$ 是电压 V 的非线性函数,经由电光反馈后都能构成BOD。这样F-P谐振腔就被一对偏振元件所代替,同时对光源的要求也大为降低,甚至可用非相干光作光源,使BOD变得更为简便。

本文介绍以液晶为介质,利用液晶场致双折射效应所引起透过率 $T(V)$ 的非线性,研究电光反馈条件下液晶光调制器的光学双稳特性。液晶材料比起文献中BOD常用 LiNbO_3 ^[6],KDP^[7]和 LiTaO_3 ^[8]等电光晶体来,有工作电压低,光学质量高,面积大,制造容易等优点。有可能为光学信息处理提供一种新的有希望的实时光调制器。

二、液晶BOD工作原理

大家熟悉的液晶显示器是一个由 90° 扭曲向列型液晶盒组成的电光调制器。由于液晶分子的各向异性,其双折射效应相当于使入射光偏振面扭转 90° 。因此在 $0^\circ/0^\circ$ 平行

(相对于液晶分子排列方向) 偏振片下为暗态, 在外电场下的光强透过率 $T(V)$ 有如图 1 所示的典型曲线^[9], 超过阈值电压($\sim$ 几伏)由暗态变亮态成为工作电压很低的显示器件。

为了使场致双折射效应最大, 我们采用 $-45^\circ/+45^\circ$ 正交偏振片(即偏振方向与分子表面排列方向成 45°)。此时光强透过率 $T(V)$ 如图 2 所示。定义 $T(V)$ 为

$$T(V) = I_2/I_1, \quad (1)$$

其中 I_1 为输入光强, I_2 为输出光强。

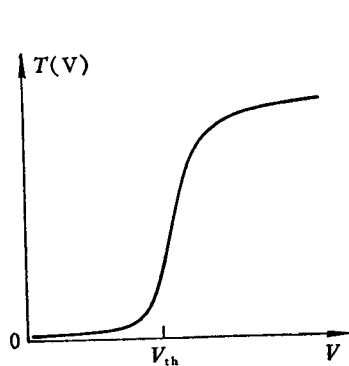


图 1 90° 扭曲向列液晶盒在 $0^\circ/0^\circ$ 偏振片下的 $T(V)$ V_{th} 为阈值电压

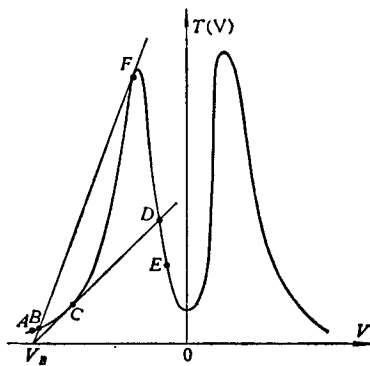


图 2 90° 扭曲向列液晶盒在 $-45^\circ/+45^\circ$ 偏振片下的 $T(V)$

在图 3 所示光电反馈装置中, 加在液晶 LC 上的电压为正比于输出光强 I_2 的反馈电压 KI_2 与固定偏压 V_B 之和

$$V = V_B + KI_2, \quad (2)$$

其中常数 K 是包括光电检测器、放大器在内的光电转换因子。利用 (1) 式和 (2) 式又可写成

$$T(V) = \frac{1}{KI_1} (V - V_B). \quad (3)$$

(3) 式是一直线方程, 如图 2 所示, V_B 是截距, $1/KI_1$ 是斜率, 随输入光强 I_1 的增大, 斜率变小。

如果能得到 (1) 式的解析式, 则联立 (1) 式和 (3) 式可解出调制器输入光强 I_1 与输出光强 I_2 的传递关系。也可用图解方法得到 I_2-I_1 关系。在固定偏压 V_B

下, 增加输入光强 I_1 相当于通过 V_B 点的直线斜率逐渐减小。由 (3) 式直线与 (1) 式曲线的交点可以得到 I_2-I_1 关系。如图 2 所示, 工作点 A 接近于零输入光强, 此时斜率较大, 随着输入光强 I_1 的增加, 斜率逐渐减小, 工作点逐渐从 A 至 B 至 C 移动, 相应的输出光强 I_2 增长缓慢。当从 C 点进一步增加 I_1 时, 装置从稳定状态进入不稳定状态, 工作点将由 C 点跳跃到 D 点, 装置又由不稳定状态变成稳定状态, 然后又连续地随输入光强增强而移至 E 点。现在如果从 E 点逐渐减小输入光强 I_1 , 则经 D 点后不再按原路跳回 C 点, 而是连续地下降至 F 点。但从 F 点继续下降时又会发生稳定-不稳定-稳定状态变化, 最后完成到 B 点的跳跃。接着又连续地降至 A 点。整个过程形成如图 4 所示的滞后迴线。可见

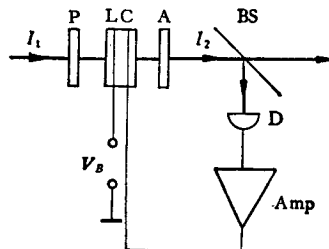


图 3 光电反馈装置

D ——光电检测器; LC ——液晶盒;
 Amp ——放大器; BS ——分束器;
 P ——起偏器; A ——检偏器

在工作点 B, C 之间的任一输入光强存在有两个输出状态, 即一个暗态和一个亮态。这种在光学系统中出现的类似于磁滞迴线的现象称为光学双稳态。

除了这种运用方式外, 还有第二种运用方式^[7]。如果把输入光强 I_1 固定在某值, 观察随偏压 V_B 的改变, 输出光强 I_2 的变化, 则相当于 (3) 式直线方程的斜率不变, 只沿横座标作平移。从两者的交点可得到第二种运用方式的光学双稳, 如图 5 所示。

如果 $T(V)$ 曲线具有多个峰值, 或是电压的周期函数, 则两种运用方式都能观察到多稳态现象。

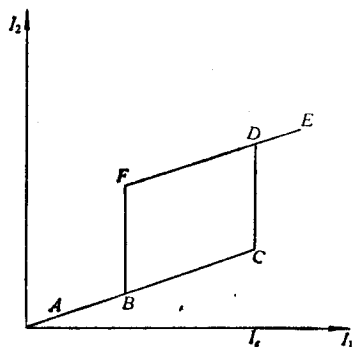


图 4 BOD 的输入-输出传递曲线 I_2-I_1
(I_c 为临界输入光强)

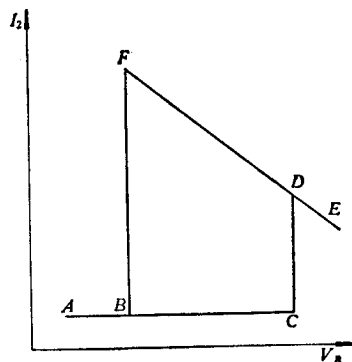


图 5 第二种运用方式
 I_2-V_B 关系

三、实 验

1. 实验装置

图 6 为实验装置简图, 由 0.8 mW 的 He-Ne 激光器作光源, 输入光强 I_1 由一平移连续衰减器 CA 控制, 分束器 BS 使一路光由光检测器 D_1 接收, 经放大后驱动 X-Y 记录仪的 x 轴, 作为 I_1 的变化。另一路光经起偏 Glan 棱镜, 液晶盒 LC, 和检偏 Glan 棱镜至输出光检测器 D_2 。正比于 I_2 的光电信号经放大再和偏压 V_B 一起加在液晶盒上。同时把正比于 I_2 的信号加在 X-Y 记录仪的 y 轴上, 作为 I_2 的变化。当偏压固定在某值时, 平移连续衰减器 CA, 可得到 I_2-I_1 曲线记录, 即第一种运用方式。

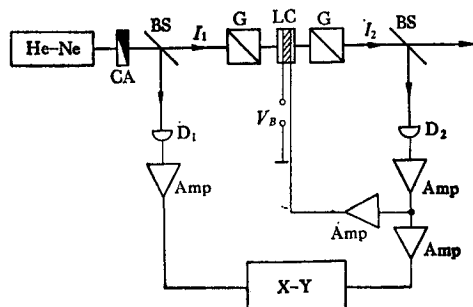


图 6 BOD 实验装置图

如果固定输入光强 I_1 于某值, 改变 V_B 可得到 I_2-V_B 曲线的第二种运用方式。 V_B 由超低频信号发生器输出的三角波, 以偏压方式加在液晶上, 同时驱动 X-Y 记录仪的 x 轴, 则可得到 I_2-V_B 曲线记录。

光检测器 D_1 和 D_2 是硅光电池, 所有放大器都由通用运算放大器组成, 光电反馈转换因子 k 并非一常数, 与光强 I_2 值有关, 当 I_2

从 0.002 至 0.09 mW 时, k 值相应变化范围为 200 至 121。液晶盒是 90° 扭曲向列液晶盒, 液晶材料是苯基环己烷类化合物 ($\text{C}_5\text{H}_{11}-\text{H}-\text{O}-\text{CN}$) (a compound of phenylcyclohexane)。液晶盒厚度为 $10\ \mu\text{m}$, 工作于室温。

2. 液晶电光调制器的透过率特性

图 7(a) 为实验所用 90° 扭曲向列液晶盒在 $0^\circ/0^\circ$ 偏振片下, 用线性电压扫描得到的典型透过光强曲线。图 7(b) 为同一液晶盒在 $-45^\circ/+45^\circ$ 正交偏振片下的透过光强曲

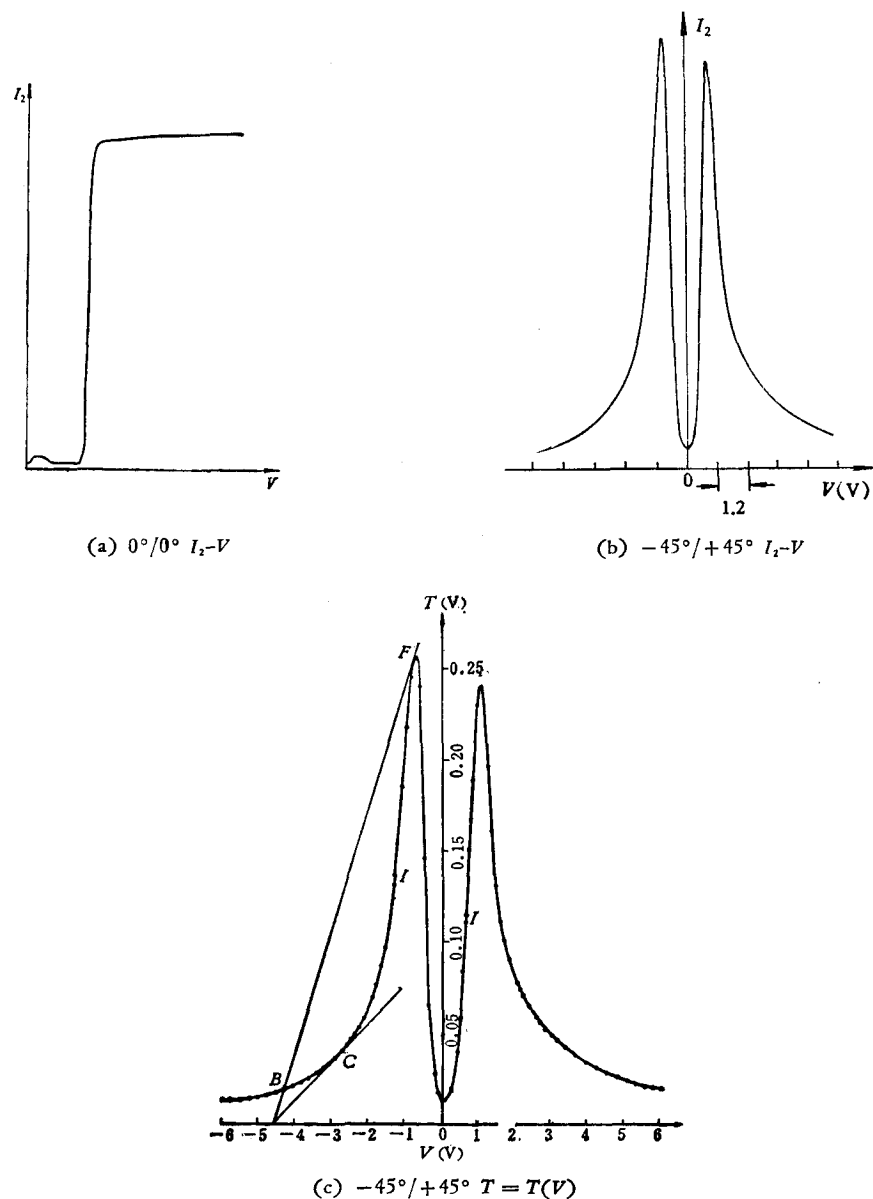


图 7 液晶盒的透过特性与电压关系

线 I_2-V 。当用输入光强归一化后,得到的 $-45^\circ/+45^\circ$ 偏振片下的透过率曲线 $T(V)$ 如图 7(c) 所示。

3. 第一种运用方式

图 8 为液晶 BOD 的输入-输出光强传递关系实验结果。曲线的右上方是偏压 V_B 值。从这些曲线可以看到,在 V_B 值处于 -5.5 至 0 V 范围内存在双稳特性,并且随着工作点 V_B 的增加,临界输入光强 I_c 逐渐减小,这些结果与图解法一致。从图 7(c) 的透过率特性曲线 $T(V)$ 可以看到,当选定工作点 V_B 后,双稳区位于工作点与 F 和 C 的连线所构成的夹角内,因此夹角大小可以用来衡量双稳区的宽度。显然当 V_B 增加时, C 点的斜率增加,意味着临界输入光强要减少,与此同时,随 V_B 增加,夹角也减小。当 V_B 位置正好与 $T(V)$ 曲线拐点切线的截距相一致时,夹角为零, F 和 C 与拐点 I 重合。此时为双稳区宽度趋向于零的极端情况,因此双稳区的边沿可由拐点 I 来确定。我们从 $T(V)$ 曲线得到两拐点所相应截距分别为 $V_B = -1.8$ V 和 $V_B = +0.3$ V,与 $V_B = -2.0$ V 和 $V_B = 0$ V 的实验结果基本一致。误差主要来源是激光输出功率的涨落,液晶本身的不稳定性以及电路的漂移。同时也说明在 $V_B = -2.0$ V 时为什么双稳消失,以及在 $V_B = -5.5$ — -2.0 V 和 $V_B = -1.3$ — 0 V 这两个双稳区是分别由 $T(V)$ 的双峰分布产生的。

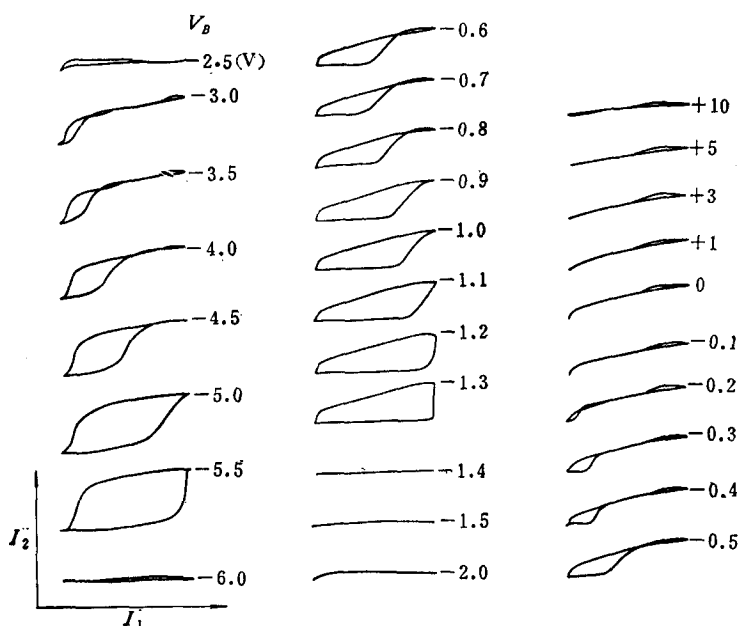


图 8 液晶 BOD 的 I_2-I_1 关系(第一种运用方式)
(曲线右上方是偏压 V_B 值,以 V 为单位)

在图 8 中没有观察到多稳态,因为在我们的实验条件下,最小能达到的斜率 $1/KI_1 = 0.025$ 左右,还不足以达到多稳态所需的低斜率。因此如果改变实验条件能有较大 KI_1 乘积,使斜率 $1/KI_1$ 足够低时,则不仅能观察到多稳态,而且在 $V_B = -2.0$ V 时也能观察到

由 $T(V)$ 的第二个峰所产生的双稳态。

4. 第二种运用方式, I_2-V_B 关系

以 I_1 作为参量, 改变偏压 V_B , 可得到图 9 所示 I_2-V_B 的实验结果。偏压变化范围从 $-6 \sim +6$ V, 几乎对所有输入光强 I_1 都能观察到双稳现象。双稳区随 I_1 的增加向 V_B 减小方向移动, 这是由于较大的 I_1 , 直线有较低斜率, 因而能在较负偏压时就进入双稳区。当 I_1 很大时, 例如 $I_1 = 0.3$ mW 时, I_2-V_B 曲线接近于直线, 并具有负斜率, 正如图解法所预计的那样。这种现象与文献 [7, 8] 在电光晶体中所得结果类似。

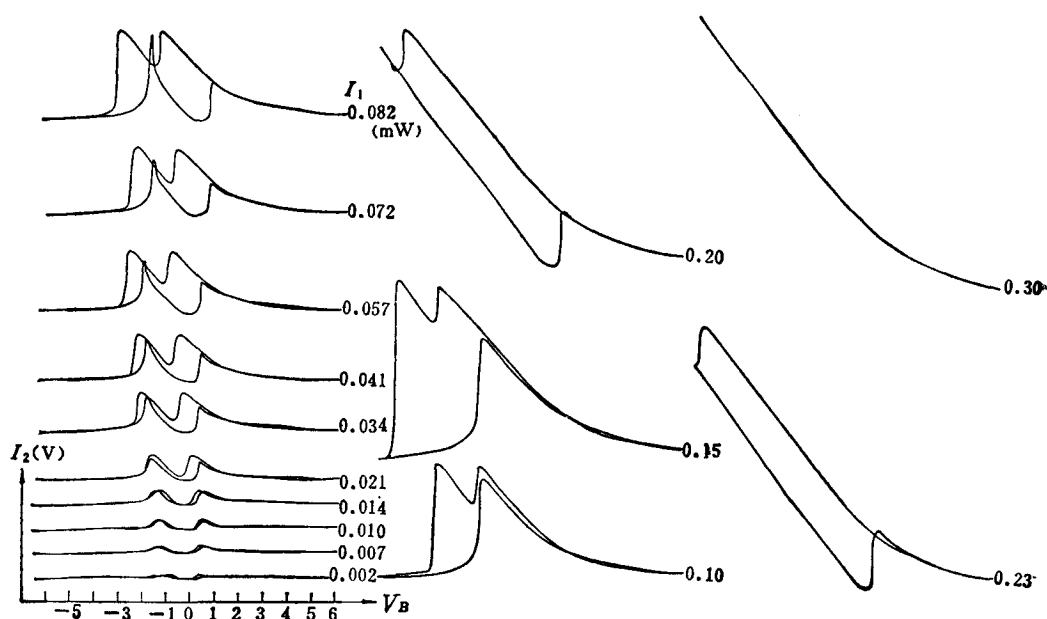


图 9 液晶 BOD 的 I_2-V_B 关系(第二种运用方式)
(曲线右端为输入光强 I_1 值, 单位是 mW)

5. 光学逻辑元件

在液晶 BOD 第一种运用方式中, 利用双稳区输出是输入的多值函数这个特征, 可以做成光学逻辑元件, 如图 10(a) 所示。让 BOD 的输入光强固定在双稳区中某值 I'_1 处, 此时 BOD 的输出光强为 I'_2 , 处于暗态。现若外加一光照脉冲, 当光照脉冲幅度迭加在 I'_1 上所得总光强超过临界光强时, 系统会产生跃跳, 由原来输出光强 I'_2 的暗态, 跃跳至 I''_2 的亮态, 此时即使外加光照脉冲已消失, 系统仍能处于 I''_2 亮态而具有“记忆能力”。图 10(b) 为光照脉冲和 I_2 随时间变化情况, 注意到亮态与暗态光强比为 $I''_2/I'_2 \sim 6.3/1$ 有足够对比度。选择更好双稳特性的 BOD 能有更高对比度。因此利用第一种运用方式可以做成“与”门, “非”门等光学逻辑元件或者利用它的“记忆”能力可以做成二进制光学存储元件。

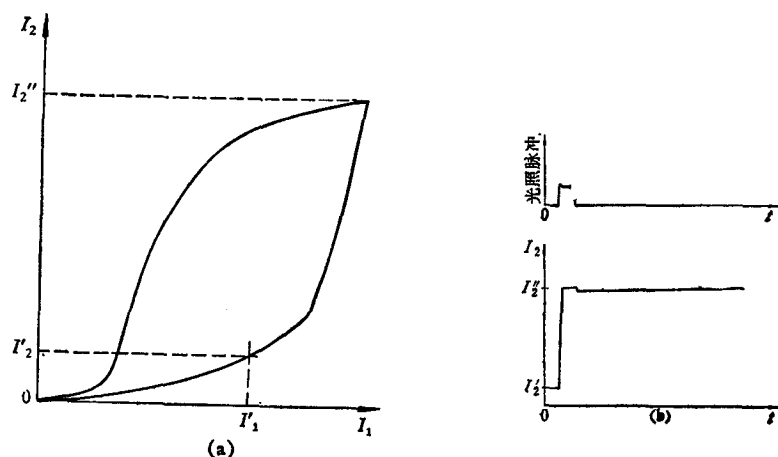


图 10 液晶 BOD 作光学逻辑元件

6. 超线性调制

上面已经提到,在 BOD 的第二种运用方式中,当 I_1 足够大时, I_2-V_B 呈现负斜率线性关系,其线性范围极为宽广。在我们的实验条件下,线性范围 $\Delta V \sim 8\text{ V}$,与不加光电反馈的光调制器比较,例如如图 7(c) 的 $T(V)$ 特性曲线,其线性范围十分狭窄 ($<1\text{ V}$)。相比之下, I_2-V_B 关系呈现的线性关系可称之为“超线性”。利用 BOD 这种超线性关系可作成动态范围极宽的电光调制器。图 11 为液晶 BOD 对各种不同波形电信号(以偏压方式加到调制器上)所得到的光输出波形。由图 11 可见这种调制的失真很小。BOD 超线性调制器也能做成光-光调制器,只要把接收到的光电信号作为偏压加在调制器上,或者把光信号直接照射在光检测器 D_2 上即可。因此利用液晶 BOD 超线性可做成工作电压很低,动态范围宽广的电-光或光-光调制器。它的缺点是响应时间太慢。因此提高液晶材料本身的响应时间十分重要。

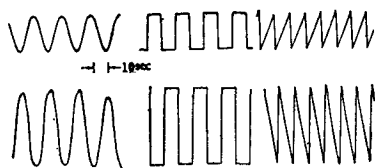


图 11 液晶 BOD 的超线性调制。

上图输入电信号; 下图为输出光信号

7. 多稳态现象

假如透过率曲线 $T(V)$ 具有几个峰值,或是电压的周期函数,由图解法可知,只要 $1/KI_1$ 足够小(第一种运用方式)或 V_B (第二种运用方式)有足够大的变化范围,就能观察到多稳态现象。图 12 为两种运用方式下的多稳态现象。

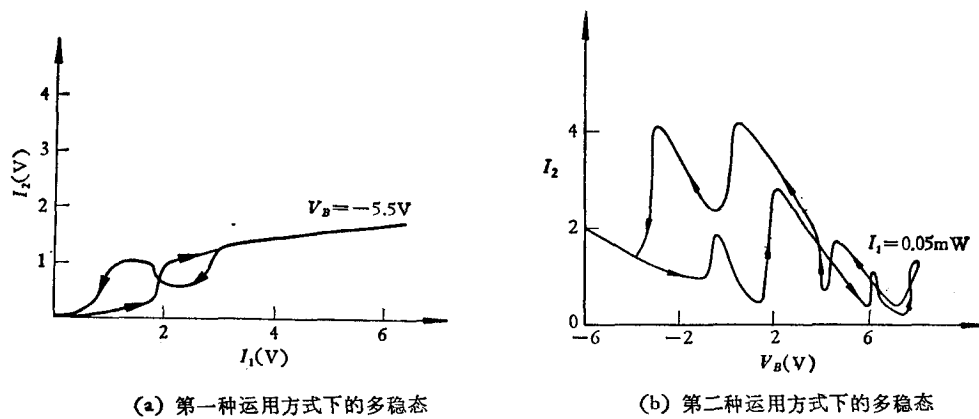


图 12 BOD 的多稳态现象

8. 瞬态行为

BOD 的静态特性已经研究得很多,近两年来 BOD 的瞬态行为颇受重视. Bischofberger 和 Shen^[4] 讨论了 Kerr 介质(液晶,硝基苯,和 CS₂) F-P 标准具的瞬态行为. Garmire^[10] 对混合 BOD 的瞬态行为给出了近似模型,电压 V 的响应遵守弛豫方程

$$(\tau_1 + \tau_2) \frac{dV}{dt} = V_{in} T(V + V_B) - V,$$

其中 τ_1 是输出信号对输入信号的响应时间, τ_2 是反馈信号对输出信号的响应时间, V_{in} 为输入光强相应电压. Garmire 指出并首先观察到限制开关速度的“临界延迟”(critical slowing down) 现象,即当输入光强接近于临界输入光强时,开关时间变得很长. 这种临界输入延迟现象几乎是所有非线性物理系统共有的特性. 在非线性振动^[12],隧道二极管^[13]中都观察到类似现象. Bonifacio 和 Lugiato^[11] 分析了 F-P 腔内两能级系统的“临界延迟”.

我们研究了液晶 BOD 的瞬态行为,在我们的情况下,除光电检测器的响应时间外, τ_1 还包括液晶本身的响应时间. τ_2 是驱动液晶的反馈电路的响应时间. 为了观察液晶 BOD 的瞬态响应,应使反馈电压 KI_2 有更大的变化范围,为此在原来反馈电路基础上又增加了一级放大,使光电转换因子 $K \approx 900$. 最后一级的负载电阻 $R = 6.8 \text{ k}\Omega$. 同时还加并联电容,选择不同容量可随意改变反馈系统的响应时间. 瞬态响应的观察是在固定偏压 V_B 下,输入不同幅度阶跃输入光强,记录 BOD 的输出光强随时间的变化. 输入光强的阶跃波形由快门控制,输出光强随时间变化由 X-Y 记录仪记录. 在我们的实验条件下,光电检测器(硅光电池)的响应时间 $\leq 1 \text{ ms}$. 在临界延迟测定中,并联电容 $C = 220 \text{ }\mu\text{F}$,反馈电路响应时间 $\tau_2 = RC \sim 1.49 \text{ sec}$,液晶本身打开时间约为几十毫秒. 图 13(a) 为 $V_B = -3 \text{ V}$ 时, BOD 的 I_2 - I_1 静态传递曲线. BOD 的瞬态行为都在此条件下进行. 图 13(b) 为 I_2 - t 曲线,其中 I_1 以参量出现.

从这些曲线,可以看到: (a) I_1 远离临界光强 I_c 时, I_2 出现过冲 (overshoot). (b) I_1 趋近于 I_c 时,出现非线性“临界延迟”现象, BOD 的开关时间变得很长. 当 $I_1 = I_c$ 时是

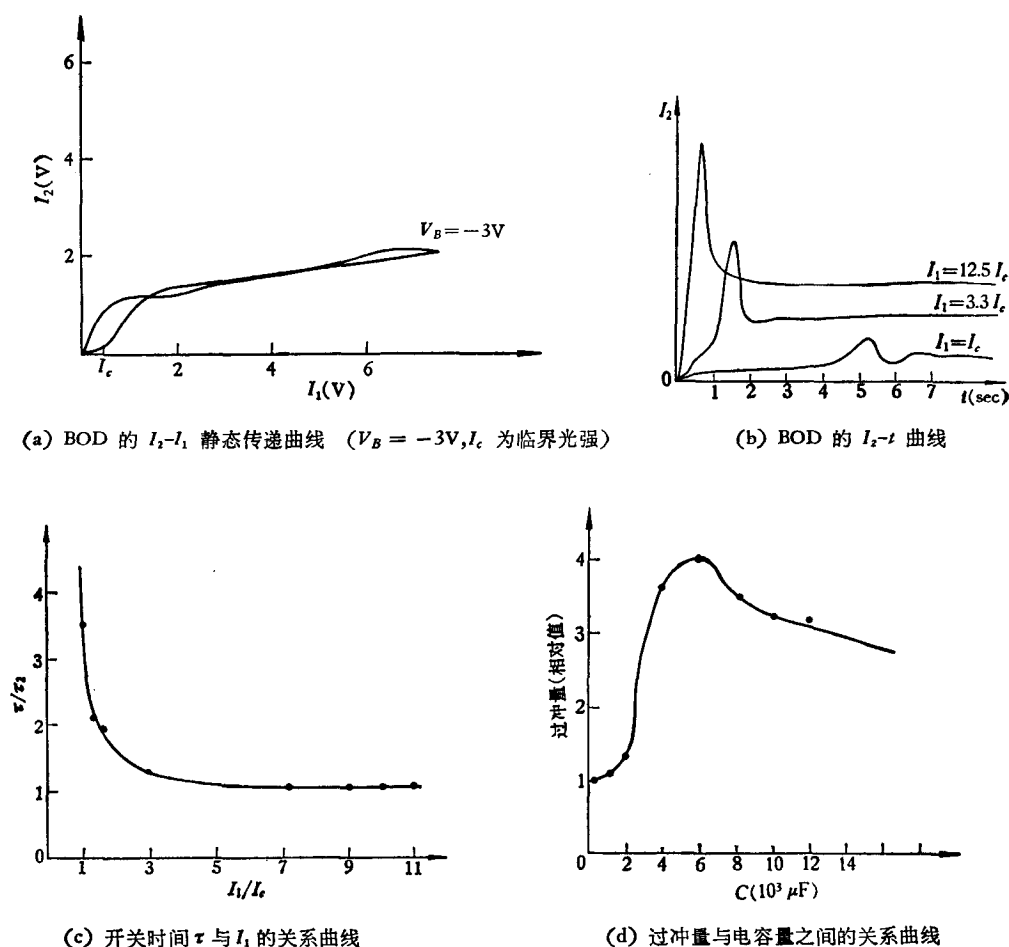


图 13 液晶 BOD 的瞬态行为

发散的. 如果定义 τ 为 I_2 达到静态值所需时间, 则 τ 与 I_1 的关系曲线见图 13 (c). 其中 τ 已对反馈电路响应时间 τ_1 归一化, I_1 已对临界输入光强 I_c 归一化. (c) 在 $I_1 \sim 1.15 I_c$ 时出现振铃 (ringing) 现象, 一种周期衰减振荡, 振荡周期 $T = 0.8 \text{ sec}$, 相应频率为 1.3 Hz , 说明此时负载具有感抗性质. (d) 在 I_1 远离 I_c 时出现过冲, 其过冲量与并联电容 C 有关. 图 13 (d) 表示它们之间的关系, 从曲线可知, I_1 远离临界输入光强时, 能提高液晶 BOD 的开关速度, 使“临界延迟”现象变得不重要.

总之, 液晶 BOD 与其它电光晶体 BOD 一样^[10], 当接近临界输入光强时, 开关时间很长, 出现“临界延迟”现象. 其开关时间远大于电路以及液晶本身的响应时间. 因此作为开关使用时, 应使 BOD 处在 $I_1 \gg I_c$ 的条件下工作.

四、结 论

我们用扭曲向列液晶作为非线性介质, 在电光反馈的混合装置中首先观察到了两种

运用方式下的光学双稳现象, 其结果与图解法一致。介绍了这两种运用方式在光学逻辑元件(或光学存储元件)和超线性调制等应用的实验结果。此外, 还研究了液晶 BOD 的瞬态行为, 观察到了“临界延迟”现象, 测定了开关时间。这些结果可以由 Garmire 等关于混合 BOD 的瞬态模型来定量的解释。

由于液晶 BOD 的工作电压低, 光学质量好, 面积大, 利用它的双稳特性有可能成为一个响应时间在几十毫秒量级的实时图像限幅器, 从而在光学信息的非线性处理中起重要作用。

本工作是在沈元垠教授的建议下进行的, 实验中所用液晶盒由清华大学提供, 作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Seidel, U. S. Patent 3, 610, 731.
- [2] A. Szöke, V. Danean, J. Goldhar, N. A. Kurnit, *Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 376.
- [3] F. S. Felber, J. H. Marburger, *Appl. Phys. Lett.*, **28**(1976), 731.
- [4] T. Bischofberger, Y. R. Shen, *Phys. Rev.*, **A19**(1979), 1169.
Appl. Phys. Lett., **32**(1978), 156.
- [5] P. W. Smith, E. H. Turner, *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 280.
- [6] E. Garmire, J. H. Marburger, S. D. Allen, *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 320.
- [7] A. Feldman, *Appl. Phys. Lett.*, **33**(1978), 243.
- [8] M. Okada, *Opt. Commun.*, **28**(1979), 300.
- [9] M. Schadt, W. Helfrich, *Appl. Phys. Lett.*, **18**(1971), 127.
- [10] E. Garmire, J. H. Marburger, S. D. Allen, H. G. Winful, *Appl. Phys. Lett.*, **34**(1979), 374.
- [11] R. Bonifacio, A. L. Lugiato, *Opt. Commun.*, **19**(1976), 172.
- [12] J. J. 斯托克, 力学及电学系统中的非线性振动, 上海科学技术出版社.
- [13] R. Landauer and J. W. F. Woo, in “Synergetics”, edited by H. Haken, Teubner, Stuttgart (1973).

A BISTABLE LIQUID CRYSTAL ELECTRO-OPTIC MODULATOR

ZHANG HONG-JUN DAI JIAN-HUA YANG JUN-HUI GAO CUN-XIU

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A new liquid crystal hybrid bistable optical device (BOD) is introduced. The optical bistability of two modes of operation of this LC BOD have been observed. The use of LC BODs for optical logic elements and ultralinear modulation applications is described. The transient response of LC BODs has been studied and a “critical slowing down” phenomenon has been observed. The switch time has been measured. The experimental results are in agreement with Garmire's theory.