

实验 55 液晶光学双稳和混沌

光学双稳态概念最早（1969 年）是在可饱和吸收介质系统中提出的，并于 1976 年首次在钠蒸气介质中观察到。光学双稳态引起人们极大注意的主要原因是光学双稳器件有可能应用在高速光通信、光学图像处理、光存储、光学限幅器以及光学逻辑元件等方面。尤其是用半导体材料制成的光学双稳器件，具有尺寸小、功率低和开关时间短等特点，有可能发展成为未来光计算机的逻辑元件。

混沌是一种普遍的自然现象。20 世纪 60 年代，人们开始认识到，某些具有确定性的非线性系统，在一定参数范围内能给出无明显周期性或对称性的输出，这种表面上混乱的状态就是混沌。混沌现象揭示了在确定性和随机性之间存在着由此及彼的桥梁，有助于将物理学中确定论和概率论两套描述体系联系起来，这在科学观念上有着深远的意义。目前，对混沌问题的研究，已经成为物理学科的一个重要的前沿课题。光学双稳系统在适当的条件下能够表现出丰富而有趣的混沌运动现象。20 世纪 70 年代末发展起来的光电混合型光学双稳系统，其数学模型清晰，实验装置简单。利用液晶充当双稳态工作物质，具有工作电压低、受光面积大、易制作、易控制和易实现器件集成化等优点。本实验采用“液晶光电混合型光学双稳与混沌系统”来研究液晶的光学双稳和混沌运动。

【实验目的】

1. 学习掌握液晶的基本原理；
2. 研究液晶的光学双稳和混沌现象。

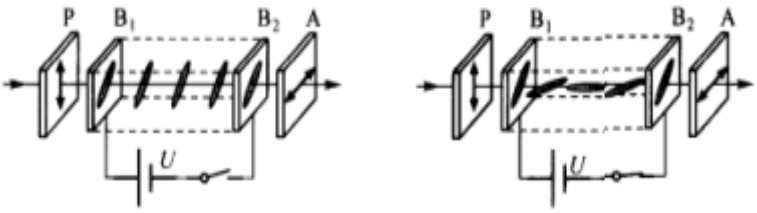
【实验原理】

1. 液晶的一般知识

液晶的类型：一些有机材料在一定温度区间呈现液晶态，它处于液态和固态之间，液晶就是这样一种物质。根据液晶分子排列的有序性，可以将液晶划分为三大类：近晶相、向列相和胆甾相液晶。

液晶盒：液晶通常被封装在液晶盒中使用，液晶盒是由两个透明的玻璃片组成，中间间隔约为 10~100 μm 。在玻璃片内表面镀有透明的氧化铟锡，以透明导电薄膜作为电极，液晶从两玻璃片之间注入。电极薄膜经过机械摩擦、镀膜、刻蚀等工艺处理，可以使液晶分子平行玻璃表面排列（沿面排列），或者垂直玻璃表面排列（垂面排列），或者成一定的倾斜角度排列。对液晶施加电场使液晶的排列方向发生变化，由于液晶分子的排列方向发生变化，按照一定的偏振方向入射的光，将在液晶中发生双折射，这就是电控双折射效应。液晶显示出光学各向异性，是由于它的细长分子结构，这种结构使得在分子的轴向和垂直于轴的方向上具有不同的物理性质。在

实验中，液晶盒位于两个正交的偏振片 P 、 A 之间，其透光轴方向如图 1-1 所示。 B_1 、 B_2 分别是液晶盒的前后玻璃基片。这里使用的是正性向列相 5CB 液晶，液晶分子在 B_1 、 B_2 上沿面排列，分子轴在起



1-1(a) 不加电场

1-1(b) 施加电场

图 1-1 电控双折射效应

偏器 P 上的投影与 P 的透光轴成 45° 。若不施加电场, 如图 1-1(a)所示, 假设有一束光自左方射入, 由起偏器 P 产生的线偏振光在液晶分子层中传播后, 有一部分光通过检偏器 A 。若在液晶盒上施加电场, 由于电场对液晶分子的取向作用, 使得大多数分子的长轴趋于电场方向排列, 如图 1-1 (b) 所示, 使整个液晶盒变得像一个光轴(即分子轴)倾斜于表面的晶片那样, 对入射光产生双折射作用。一般来说, 入射线偏振光经过液晶盒后将变成椭圆偏振光, 从而有一部分光能够通过检偏器出射。若使电场强度在一定范围内变化, 则由于光轴的倾斜程度随之改变, 造成折射率也随之变化, 因而可以改变透射光的强度, 即对输出光强进行调制。但是, 当电场强度进一步增大时, 透明的液晶盒又会变成不透明, 这是因为伴随着电场强度的提高产生了动态散射效应。

2. 光学双稳态

光学双稳态是光在通过某一光学系统时其光强发生非线性变化的一种现象, 即对一个入射光强 I_i , 存在两个不同的透射光强 I_o , 并以滞后回线形式为特征, 如图 1-2 所示。按照工作原理的不同, 光学双稳态可分为纯光学型和光电混合型两种。

纯光学型光学双稳是指光由于法布里-珀罗腔内非线性介质的吸收、色散或吸收与色散同时存在而导致的。这种类型的光学双稳系统需要在强光下工作, 介质的非线性是由光场本身引起的。光电混合型光学双稳是利用透射光信号经放大反馈到非线性介质上而实现的, 用非相干弱光既可以实现。利用电控双折射效应引起透过率的非线性变化可实现电光调制器。

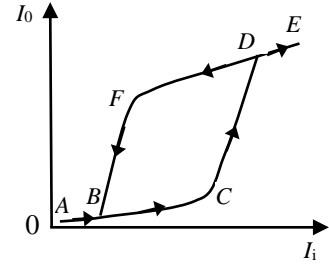


图 1-2 光学双稳曲线

液晶光电混合型双稳装置由电光调制系统与输出反馈系统两部分组成, 图 1-3 为原理图。 I_i 为输入光强, I_o 为输出光强。为使透射光最大, 分子轴在起偏器 P 上的投影与 P 的透光 45° 角。 P 、 A 和液晶构成正交光路。液晶上加一直流偏压 V_b , 使液晶处在适当的工作状态。经光电探测器实现光电变换, 得到的电信号经放大器放大后加到液晶上, 从而构成了光电混合反馈回路, 控制输出关系, 促成 I_i - I_o 之间的双稳关系。 I_i 和 I_o 应满足如下关系:

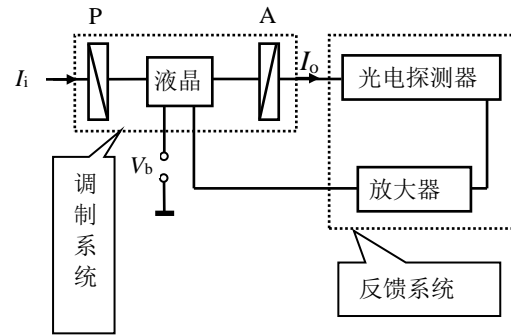


图 1-3 光电混合型光学双稳装置原理图

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V + V_b + V_s) \right] \right\} \quad (1-1)$$

V_π 为半波电压, V_s 为附加电压 (液晶剩余应力引起), k 为包括光探测器和放大器在内的光电转换系数。

如果将输出光强 I_o 通过光电转换器件线性地转换成电信号 V , 反馈加在液晶的控制电极上, 则反馈电压 V 正比于输出光强:

$$V = k I_o \quad (1-2)$$

其中 k 为包括光电探测器和放大器在内的光电转换系数。现将式 1-2 变换为如下形式:

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{V}{kI_i} \quad (1-3)$$

方程(1-1)是一条正弦平方曲线, 方程(1-3)是一条直线, 直线的斜率与入射光强成反比. 求解方程(1-1)和(1-3)组成的方程组可得到表征器件工作状态的解. 分别作出方程(1-1)的调制曲线和方程(1-3)的反馈曲线, 它们的交点即为两方程的共同解. 由图1-4可见, 当入射光强由小到大按照 $I_i^1 \rightarrow I_i^2 \rightarrow I_i^3 \rightarrow I_i^4$ 变化时, 工作点则依次按照 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ 变化, 在 C、D 点透过率产生由低到高的突变; 反之, 若减小入射光强, 使其按照 $I_i^4 \rightarrow I_i^3 \rightarrow I_i^2 \rightarrow I_i^1$ 变化时, 工作点则沿着 $E \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow B \rightarrow A$ 变化, 在 F、B 点产生由大到小的突变. 因此, 系统的 I_i - I_o 关系成为如图1-2所示的滞后回线. 如果方程组的解是单值的, 则无双稳态. 因此, 要求整个装置必须工作在双稳态临界范围之内. 所谓临界范围是指方程组具有双解的范围, 图1-4中 B、C、D、F 所包围的区域即为临界范围. 对应一个初始偏压 V_b 既有一个临界范围, 反之亦然, 或者说, 在 V_b 、 V_s 、 V_π 等反馈参数均固定的情况下, 临界范围是确定的.

3. 混沌态

混沌是指在确定性的动力学系统中的无规则行为或内在随机性. 混沌不是噪声, 是对初始条件极其敏感的非周期性有序运动. 对相空间的一定区域进行长时间观察会发现系统运动轨迹的各态遍历性.

一个系统可以导致混沌运动出现, 其基本思想是实现这样的数学反馈回路: 系统的输出能够不断地反馈到它自身作为新的输入. 这种回路无论简单还是复杂, 都可以出现稳定的行为或混沌的行为. 它们的差别, 仅在于系统的某一参数取值不同. 这个参数只要有极小的变化, 就会造成回路系统的行为从有序状态, 平滑地转化为表面上看似乎是杂乱无章状态, 即逐步地演化为混沌.

液晶光电混合光学双稳系统可用如下的延时耦合方程来描述

$$I_o(t) = \frac{1}{2} I_i \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V(t) + V_b + V_s) \right] \right\} \quad (1-4)$$

$$\tau \frac{dV(t)}{dt} + V(t) = k I_o(t - t_R) \quad (1-5)$$

(1-4) 方程是描述系统的调制方程, (1-5) 方程是描述反馈系统的德拜弛豫方程. $V(t)$ 是考虑了时间变量的反馈电压, t_R 表示系统的延迟时间, τ 是反馈系统的弛豫时间. 在双稳态的讨论中事实上只考虑了系统的定态 (即 $dV(t)/dt = 0$ 的情况), 而没有考虑其动态效应.

在本实验中, 当输出光强 I_o 加上一定的时间延迟 t_R 后, 再正反馈到液晶上, 可以观察到混沌现象, 延迟时间通过程控来实现.

【实验仪器】

光电混合型光学双稳实验装置如图1-5所示. 用 He-Ne 激光作为光源, 光经过由线偏振器 R_1 和半波片 R_2 组成的光强调节器, 入射到由两个正交的线偏振器 P 和 A 及液晶 (LC) 组成的电光调制器上, 输出光强由光电二极管 D_1 接收. 当测试双稳曲线时, 将 D_1 输出信号经放大器 AMP₁ 放大后, 分成 1 和 1' 两路, 1 路加在液晶上作为反馈电压, 1' 路接在示波器上, 实时观

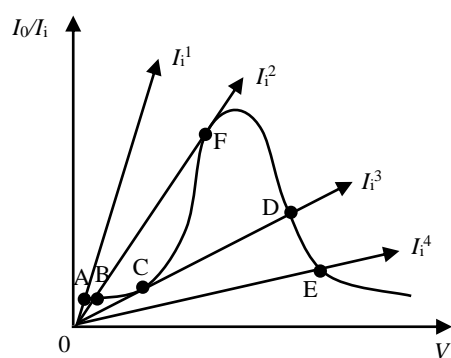


图 1-4 入射光强变化时系统的状态点

察输出信号的变化. 当测试混沌实验时, 将 D_1 输出的信号经放大器 AMP_1 放大后送入A/D 卡, 其功能是: 将采集的模拟信号转换成数字信号, 通过编程对数字信号进行延时处理. 输出的延时信号经放大器 AMP_2 放大后, 分成 2 和 $2'$ 两路, 2 路加在液晶上作为反馈控制信号, $2'$ 路接在示波器上. 液晶的初始偏压 V_b 由其电极上串接的一直流电源 (Power1) 来提供. 通过调节 V_b , 可以选取系统的适当的工作状态. 此外, 为了检测输入光强, 在光路中加了一片分光镜BS, 通过光电二极管 D_2 接收, 信号经放大器 AMP_3 放大后, 作为入射光强的参考信号. D_1 和 D_2 由直流电源 (Power2) 提供12 V偏置电压.

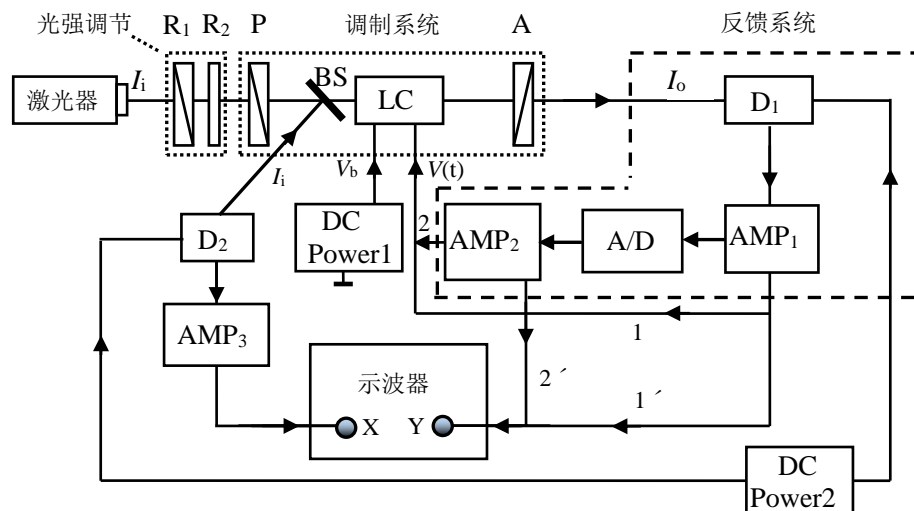


图 1-5 光电混合型光学双稳与混沌系统工作原理图

【实验内容与步骤】

1. 液晶扭曲角的测量

- (1) 主机面板旋转到直流档;
- (2) 放置激光器、起偏器、检偏器和光功率计, 调整光路使各光学器件同轴等高, 调起偏器使激光输出光强最大, 调液晶和检偏器使激光输出光强最小. 记录检偏器对应的角度 θ_1 ;
- (3) 在光路中放入液晶盒, 再一次调整检偏器的角度, 使输出光强最小, 检偏器对应的角度 θ_2 ; 液晶的扭曲角为 $\theta_2 - \theta_1$.

2. 测量液晶的响应时间 τ

- (1) 主机面板旋转到方波档;
- (2) 光路依次放置激光器、起偏器、液晶、检偏器和光电二极管, 调各光学器件同轴等高;
- (3) 光电二极管输出端, 接主机面板上测量光的输入端口, 主机面板测量光输出端口和示波器通道 2 连接, 由于光电二极管是负反馈, 示波器通道 2“反相”开启;
- (4) 主机面板驱动输出接口与示波器通道 1 连接;
- (5) 调节起偏器和检偏器正交, 逐渐增加液晶电压, 调节示波器扫描时间, 从示波器上观察输出波形, 使输出波形接近

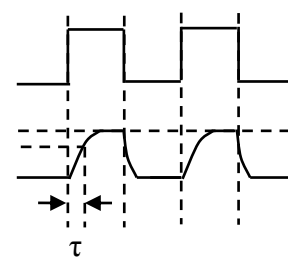


图 1-6 弛豫时间 τ

于图 1-6 所显示的形状. 用长余辉慢扫描方式, 测量 τ .

3. 观察液晶的调制曲线

- (1) 主机面板旋转到三角波档;
- (2) 光路依次放置激光器、起偏器、液晶、检偏器和光电二极管, 调各光学器件同轴等高;
- (3) 三角波波信号输入至示波器CH₁上, 液晶的输出信号输入至示波器CH₂上, 利用示波器的XY方式和长余辉慢扫描方式观察调制曲线;

4. 观察液晶的双稳曲线

- (1) 主机面板旋转到双稳态档;
- (2) 观察双稳态装置如图1-7所示;

- (3) 调起偏器 1 的偏振化方向, 使输出光最强. 调起偏器 2 的偏振化方向, 使输出光强最强, 调检偏器的偏振化方向, 使输出光强最弱.

- (4) 放入分束镜, 调整测量光路和参考光路, 使得光强最亮处分别入射到光电二极管和硅光电池. 放入电机, 并打开主机箱后面的开关.

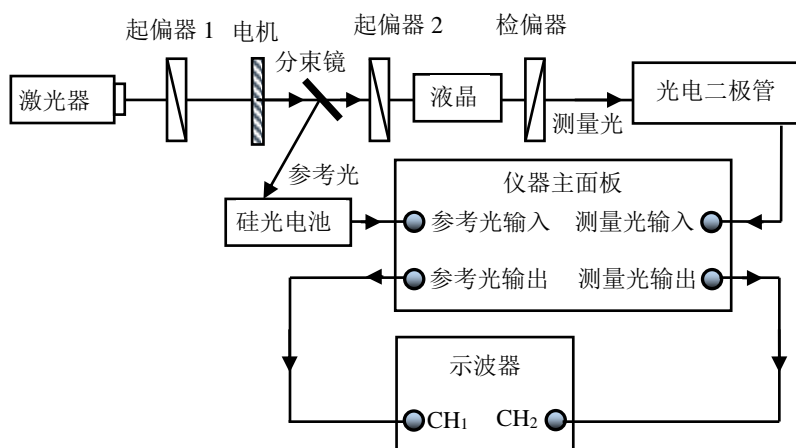


图 1-7 光学双稳装置图

- (5) 示波器显示方式选 YT 模式, 缓慢调节液晶驱动电压, 观察测量光和参考光信号强度的变化, 当驱动电压达到某一个特定值, 会观察到测量光信号出现突然增加的开关状态;
- (6) 示波器选 XY 模式, 持续时间选无限; 矢量选点; 分别调整起偏器 1、液晶的角度、检偏器的角度和初始偏压的大小, 观察上述因素对双稳曲线形状、面积等的影响. 选取 3-4 个能够说明实验现象的结果储存.

5. 观察液晶的混沌现象

- (1) 主机面板旋转到混沌档;
- (2) 光路依次放置激光器、起偏器、检偏器和光电二极管. 调整起偏器角度使输出光最强, 调检偏器角度使输出光最弱;
- (3) 放入液晶盒;
- (4) 光电二极管输出端接主板测量光输入端; 测量光输出端接示波器;
- (5) 调节液晶的驱动电压、时间反馈和检偏器的偏转角等, 观察示波器图形经历周期震荡、倍周期分叉到混沌的变化过程. 选取几个能说明实验结果的图形储存.

【注意事项】

1. 不要用手触摸光学器件表面;
2. 测量反馈系统弛豫时间时, 频率输出尽可能小;
3. 由于双稳态对初始偏压十分敏感, 调节电压要缓慢变化;
4. 利用示波器的 XY 方式和长余辉放慢扫描方式观察双稳曲线.

【思考题】

1. 什么光学双稳态？
2. 液晶混沌态的出现受到哪些因素影响？

【参考文献】

1. 熊俊. 近代物理实验. 北京：北京师范大学出版社，2007.
2. 母国光等. 光学. 北京:人民教育出版社，1978.