

染料非线性标准具的光学逻辑功能*

张 雷 李淳飞
(哈尔滨工业大学应用物理系)

提 要

本文报道用单个充染料非线性标准具成功地演示了五种全光学逻辑功能: 与、或、与非、或非和异或。并提出了一个理论模型, 根据这样模型算得的描述透射光强弛豫过程的理论曲线与实验曲线完全一致。

1982年, Rushford 等人开始对充染料的标准具的光学双稳特性进行研究^[1], 演示了透射式和反射式双稳、连续功率运转、不稳定输出与交扰效应等, 指出这种光学双稳器件属于热致折射率变化的本征型光学双稳器件。接着, 本文作者继续研究这种器件, 用若丹明和隐花菁两种染料作介质, 观察到光学双稳和多稳现象, 并利用一维热传导模型计算了阈值功率和开关速度^[2]。1983年, Jewell 等人用这种器件演示了光学逻辑功能, 获得五种光学逻辑门输出^[3]。但是他们得到的探测光输出光强依赖于时间的变化曲线与计算结果符合得不够好, 其中或门的实验结果与计算结果不符。尽管如此, 该文首次提出了一种简单的可实现全光学逻辑功能的方法。适当地选择非线性介质可以使其消耗极少的能量, 获得很高的开关速度。1984年, Jewell 把这种光学逻辑器件的原理推广到 GaAs 非线性标准具上, 也获得了部分光逻辑功能^[4]。

本文作者用充染料法布里-珀罗标准具, 也成功地观察到五种光学逻辑输出, 提出了一个理论模型。所得的计算曲线与实验曲线完全一致。

一、实验装置与实验结果

染料标准具光学逻辑功能的实验装置如图1所示。染料标准具是用两块高反射率($\lambda = 6328 \text{ \AA}$, $R = 90\%$)镜片固定在两个可以粗调的镜座上, 以精密螺杆(调节两镜平行管)和弹簧连接构成, 两镜间距为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 。若丹明溶于乙二醇形成的染料溶液利用毛细作用吸附于两镜之间形成薄膜状。 Δr^+ 激光作为信号光通过斩波器以脉冲形式入射到标准具上。令单个脉冲的热效应正好导致标准具透射峰移动半峰值宽度, 即相移变化 $\Delta\phi = \Delta\phi_{1/2}$, 并用输入脉宽不变, 而强度加倍的脉冲代替两个信号光脉冲同时共线输入, 此时相移变化可近似视为 $\Delta\phi = 2\Delta\phi_{1/2}$ 。为便于观察整个弛豫过程, 以连续 He-Ne 激光作探测光, 选用对探测光吸收很小的染料作工作介质以保证标准具有较高精细度和较低的损耗。调节标准具, 改变其相对于探测光波长的相对初相移(以 $\Delta\phi_{1/2}$ 为单位), 则得到五种光学逻辑门, 见表1。

收稿日期: 1985年3月7日; 收到修改稿日期: 1985年6月3日

* 本工作得到中国科学院科学基金会资助。

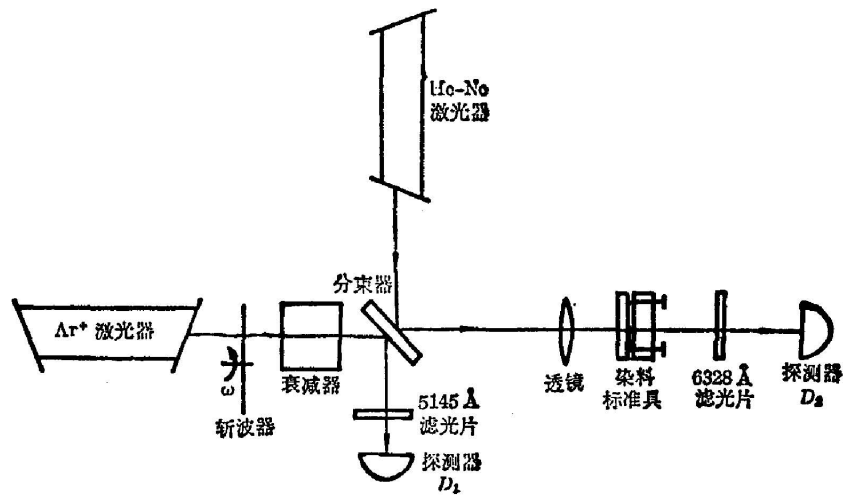


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

表 1 对应不同相对初相移的光逻辑门

Table 1 Optical logic gates corresponding to different initial phase shifts

脉冲个数 相对初相移	0	1	2	逻辑门
0	1	0.2	0	或非
$\frac{1}{2}$	0.5	0.5	0.1	与非
1	0.2	1	0.2	异或
$1\frac{1}{2}$	0.1	0.5	0.5	或
2	0	0.2	1	与

实验测得对应于相对初相移为 0、 $1/2$ 、1、 $3/2$ 和 2 的五种光逻辑门的照片如图 2 所示。图中左边是单个信号光脉冲(脉宽 4 ms)输入时的情况,右边是相当于两个信号光脉冲同时共线输入时的情况,每幅照片的上部为信号光强,下部为探测光的透射光强曲线,曲线反映了整个弛豫过程*。若令探测光在信号光的脉冲后沿到达时以脉冲形式输入,则此时的输出正好反映出所需的逻辑关系。

二、理论解释

染料标准具对探测光的透射率 $T = (I_t/I_i)$ 可近似表达为

$$T = \frac{T_m}{1 + [(2\mathcal{F}/\sigma)\sin(\phi/2)]^2}, \quad (1)$$

* 测得介质的弛豫时间约为 50 ms。

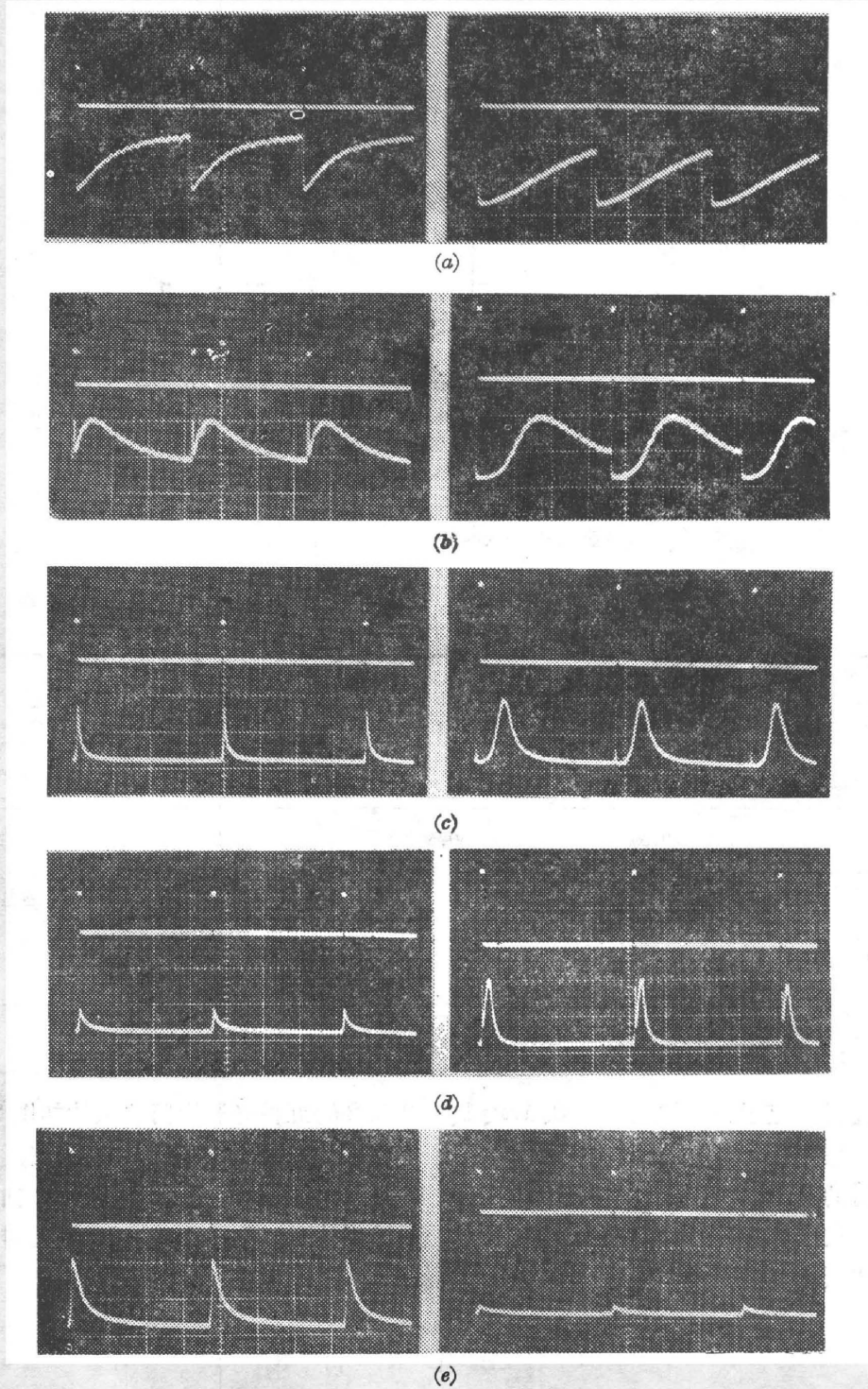


图 2 染料标准具输入和输出特性曲线(扫描速度 50 ms/div)

(a) 或非; (b) 与非; (c) 异或; (d) 或; (e) 与

Fig. 2 Input and output characteristics vs. time for the dye-filled etalon (scanning speed: 50 ms/div)

(a) Nor; (b) Nand; (c) Xor; (d) Or; (e) And

式中 $T_m = (1-R)^2(1-A)/(1-R_a)^2$ 为最大透射率, R 为腔镜反射率, A 为染料对探测光的强度吸收系数, $R_a = (1-A)R$ 为腔镜的有效平均反射率, \mathcal{F} 为标准具的精细度。信号光的加热作用引起介质折射率的改变为

$$n = n_0 + (dn/dT) \Delta T, \quad (2)$$

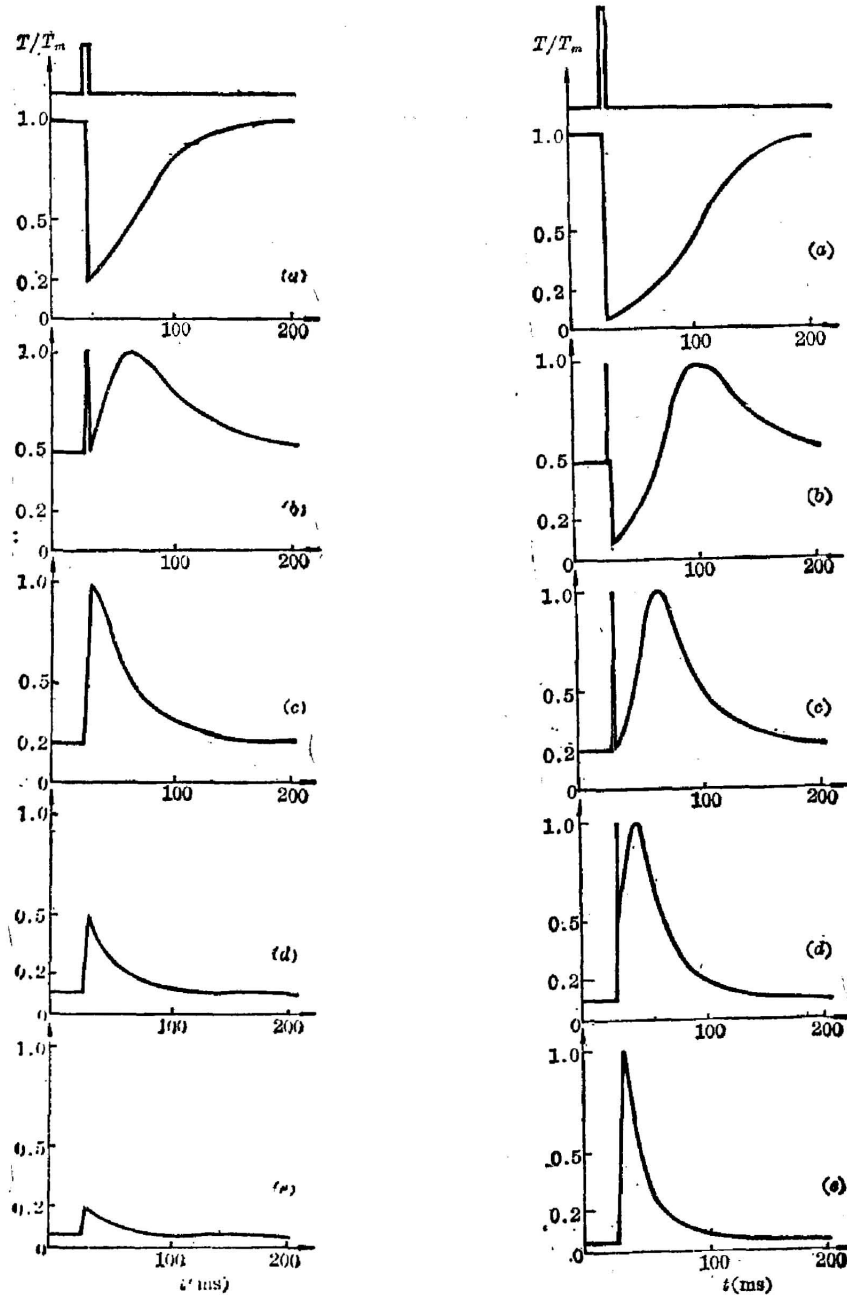


图3 计算得到的对应五种初相移的透射率变化曲线

(a) 或非; (b) 与非; (c) 异或; (d) 或; (e) 与

Fig. 3 Simulated relaxation characteristics of the transmission for five different initial phase shifts

(a) Nor; (b) Nand; (c) Xor; (d) Or; (e) And

式中 ΔT 为加热引起的温差, (dn/dT) 为介质的折射率温度系数, 对于液体染料一般有 $(dn/dT) < 0$ 。考虑到探测光在腔内的往返相移为 $\phi = (4\pi/\lambda)nL$ (λ 为探测光波长, L 为腔长), 及 $\Delta T \propto I_s$ (I_s 为输入信号光的峰值光强), 假设标准具的腔镜对信号光基本透明, 并且信号光的大部分能量被腔内介质吸收转变成热量, 则有

$$\phi = \phi_0 - KI_s, \quad (3)$$

式中 K 为与折射率温度系数、导热特性及对信号光的吸收系数有关的常数。设介质的弛豫时间为 τ , 当我们考虑信号脉冲作用过程中和作用后的弛豫过程时, 应当以德拜(Debye)弛豫方程来描述:

$$\tau(d\phi/dt) + \phi = \phi_0 - KI_s. \quad (4)$$

将(4)式分为脉冲开启至关闭及关闭之后两段时间来计算, 可求得在这两段时间内相移 ϕ 随时间的变化规律为

$$\phi = \phi_0 - KI_s[1 - \exp(-t/\tau)], \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad (5)$$

$$\phi = \phi_0 - KI_s[1 - \exp(-t_0/\tau)]\exp[-(t-t_0)/\tau], \quad t \geq t_0, \quad (6)$$

式中 t_0 为脉冲宽度。当 $t < t_0$ 即在 t_0 时刻之前呈指数下降; 当 $t > t_0$ 即在 t_0 时刻之后 ϕ 呈指数上升。如果令输入单个信号脉冲引起的最大相移变化 $\Delta\phi_M$ 等于法布里-珀罗标准具透射峰的半峰值宽度 $\Delta\phi_{1/2} = (2\pi/\mathcal{F})$, 即

$$\Delta\phi_M = KI_s[1 - \exp(-t_0/\tau)] = (2\pi/\mathcal{F}). \quad (7)$$

当脉冲宽度很窄, 即 $t_0 \ll \tau$ 时, $[1 - \exp(-t_0/\tau)] \sim (t_0/\tau)$, (7)式可改写为

$$I_s t_0 = (2\pi\tau/K\mathcal{F}). \quad (8)$$

可见对一定的非线性标准具, 所需的开关能量是一定的。如提高标准具的精细度 \mathcal{F} 、选用弛豫时间 τ 短而相移系数 K 大的介质, 都有利于降低开关能量。

根据实验中的数据, $\tau = 50 \text{ ms}$, $t_0 = 4 \text{ ms}$, $I_s = 32.9 \text{ mW}$, $\mathcal{F} = 15$, 利用(7)式算得 $K = 0.166 \text{ mW}^{-1}$ 。由公式(5)、(6)及(1)式算得当相对初相移依次取 0、1/2、1、3/2 和 2 时, 透射率 T 与时间 t 的关系曲线, 如图 3 所示。其中左边一组对应于输入单个信号脉冲, 右边一组相当于同时输入两个信号脉冲。图中的纵坐标是归一化的透射率 (T/T_m) , 横坐标为时间 t , 显然, 图 3 (透射光弛豫过程的计算曲线)与图 2 实验结果相比较, 是相当一致。

三、小 结

研究表明, 这种光逻辑器件是依靠信号光脉冲的热效应工作, 每个光脉冲只需引起法布里-珀罗透射峰半峰值宽度的相移变化, 无需用强光场激励和维持腔内介质的受激吸收和自发光。因而, 这种器件消耗的开关能量极少。用染料非线性标准具构成的光学逻辑门, 其开启时间由信号脉冲宽度决定, 可以选取不同的脉冲宽度来控制开启速度。但是从(8)式可以看出, 腔宽越窄, 所需的信号功率越高。而这种逻辑门的关闭时间与介质的弛豫时间有关, 约为 τ 的 3~5 倍。若选用具有载流子复合时间很短的半导体材料, 估计能获得 ns 量级的关闭速度。

参 考 文 献

- [1] M. C. Rushford, H. M. Gibbs *et al.*; «*International Topical Meeting on Optical Bistability*», (University of Rochester, U. S. A., June 15~17, 1983).
- [2] 李淳飞, 张雷; «*中国激光*», 1983, **10**, No. 8~9 (Aug-Sep), 464.
- [3] J. L. Jewell, M. C. Rushford *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**, No. 21 (Nov).
- [4] J. L. Jewell, Y. H. Lee *et al.*; «*ICO-13, Conference Digest, Japan, 1984*», 156.

Optical logic in a dye-filled nonlinear etalon*

ZHANG LI AND LI CHUNFEI

*(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology)**(Received 7 March 1985; revised 3 June 1985)***Abstract**

We successfully demonstrated five kinds of full-optical logic operations; And, Or, Nand, Nor and Xor with a single dye-filled etalon. A theoretical model has been suggested to explain the experiment. The simulated relaxation characteristics of the transmission were in good agreement with experimental results.

* Supported by the Scientific Foundation, Academia Sinica.