

基于激发态吸收的曙红 Y 凝胶全光开关

杨 森 司金海 李淳飞

(哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150006)

黎甜楷 沈继锋 沈玉全

(中国科学院感光化学研究所, 北京 100101)

摘 要 用倍频 YAG 脉冲激光泵浦导致三重态激发态对氩氟探测激光的非线性吸收, 演示了曙红 Y 凝胶薄片的光开关和光调制特性, 并用速率方程进行动力学数值模拟, 得到了与实验相符的结果. 文中还讨论了提高光开关和光调制性能的途径.

关键词 曙红 Y, 激发态吸收, 全光开关.

1 引 言

近年来光计算与光通信技术的发展, 驱使人们热衷于研究各种全光开关与全光调制器. Beason 等人曾报道了曙红 Y 掺杂 PVA(聚乙烯醇)的全光开关与全光调制器^[1]. 这种器件利用了有机分子三重态激发态的非线性吸收效应, 有别于基态饱和吸收的光开关器件原理^[2]. 但是在 Beason 的实验中是采用斩波器调制的氩离子连续激光信号, 器件的开关速度很慢(ms 量级), 而且该文只用稳态模型作了定性分析. 本文采用曙红 Y 凝胶薄片为样品, 在他们工作的基础上作了较大改进, 采用脉宽 20 ns 的倍频脉冲 YAG 作光源, 用速率方程进行动力学模拟, 获得了与实验一致的结果.

2 理论分析

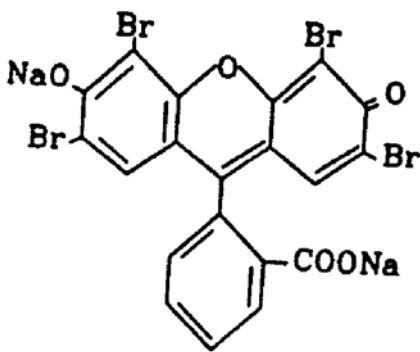


Fig. 1 The structure of Eosin Y dye

曙红 Y 分子的化学结构如图 1 所示, 它具有单重态-三重态能级结构^[1]. 线性吸收峰位于 528.7 nm 波长处, 相应吸收截面为 $\sigma_0 = 3.8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ^[1]. 若用波长为 532 nm 的倍频 YAG 激光入射样品, 则大量分子从基态 S_0 被激发至第一单重激发态 S_1 , 由于单重态-三重态的跃迁几率 ($K_{ST} \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ ^[3]) 较大, 大部分分子通过系际跃迁迅速转移至第一三重激发态 T_1 . 曙红 Y 分子三重激发态的吸收区在 500~700 nm^[4], 对 632.8 nm 波长有很强的吸收, 吸收截面为 $\sigma_T = 1.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ^[1], 在

He-Ne 探测激光作用下会有大量分子自 T_1 跃迁至更高三重激发态 T_n , 高激发态的寿命极短 ($\sim 1 \text{ ps}^{[3]}$), 快速无辐射弛豫回到 T_1 , 再通过无辐射跃迁返回基态。

因此, 如果以光功率密度为 $I_b(t)$ 的 YAG 倍频脉冲激光作泵浦光, 以光功率密度为 I 的连续 He-Ne 激光作探测光, 就能够观察到光控光开关与光调制现象: 当无泵浦光时, 探测光几乎全部透过介质, 而当有泵浦光作用时, 介质对探测光有较大吸收; 若改变入射泵浦光的功率密度, 则三重态积累的分子数不同, 对 He-Ne 探测激光的吸收也不同。

用速率方程模拟光开关与光调制的动力学过程. 建立如下速率方程组:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} n_0 \\ n_s \\ n_{T1} \\ n_{T2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma_0 I_b / h\nu_b & 1/\tau_{S0} & 1/\tau_{T0} & 0 \\ \sigma_0 I_b / h\nu_b & -1/\tau_{S0} & -1/\tau_{ST} & 0 \\ 0 & 1/\tau_{ST} & -1/\tau_{T0} - \sigma_T I_s / h\nu_s & 1/\tau_{TT} \\ 0 & 0 & \sigma_T I_s / h\nu_s & -1/\tau_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_0 \\ n_s \\ n_{T1} \\ n_{T2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$N = n_0 + n_s + n_{T1} + n_{T2} \quad (2)$$

式中 ν_b 和 ν_s 为泵浦和探测激光的频率, 分别相应于波长 532 nm 和 632.8 nm; n_0 , n_s , n_{T1} 和 n_{T2} 分别为 S_0 , S_1 , T_1 和 T_n 能级上的分子数密度; τ_{S0} 和 τ_{T0} 为第一单重激发态和第一三重激发态向基态的无辐射弛豫时间; τ_{TT} 为高三重激发态寿命; τ_{ST} 为系际跃迁时间. 并假设泵浦光脉冲为时间的高斯函数:

$$I_b(t) = I_0 \exp[-C(t/\Delta t)^2] \quad (3)$$

式中 Δt 为激光脉宽, 设为 20 ns; C 为归一化常数; I_0 为泵浦光的峰值功率密度, 取为 $3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 探测光功率密度 I , 取为 0.35 W/cm^2 .

将(2)式代入方程组(1)进行数值求解得到第一三重激发态上的粒子数密度随时间的变化关系, 如图 2 所示. 由于基态对波长为 632.8 nm 的激光的吸收可以忽略, 样品对 He-Ne 激光的吸收主要由第一三重激发态贡献. 在泵浦光作用下, 样品对 He-Ne 激光的透射率为:

$$T = I_s / I_{s0} = \exp(-\sigma_T n_{T1} L) \quad (4)$$

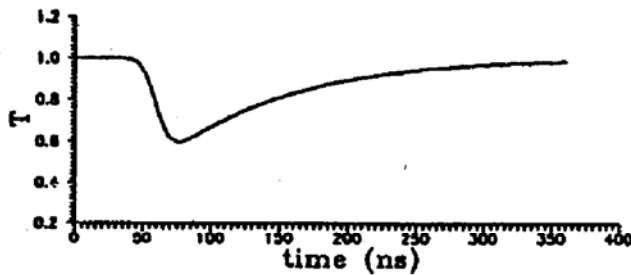


Fig. 3 The transit transmission of the aerosol of Eosin Y versus time

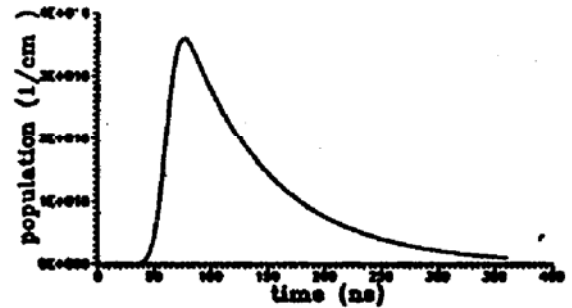


Fig. 2 The populations of triplet excited-state versus time

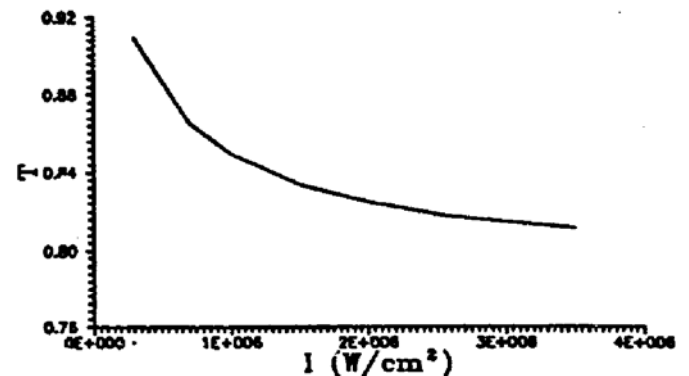


Fig. 4 The ratio of the transimission of probe beam when pump beam in on and off versus the different incident peak power densities

式中 I_t 和 I_{t0} 分别为有无泵浦光时通过样品的 632.8 nm 激光的功率密度, L 为样品厚度(设 $L = 1.3$ mm). 计算出透射率随时间的变化关系如图 3. 图中显示出在泵浦脉冲光作用下的光开关效应: 开启时间为 35 ns, 关闭时间为 600 ns. 改变泵浦光峰值功率密度 I_0 , 在以上取值条件下得到样品对探测光的相对透射率与泵浦光功率密度的关系曲线, 如图 4 所示.

3 实 验

实验中采用 YAG 倍频调 Q 脉冲激光为泵浦光, 波长为 532 nm, 脉宽为 20 ns, 可通过衰减器调节光功率密度; 用连续 He-Ne 激光为探测光, 波长为 632.8 nm. 样品曙红 Y 溶液凝胶薄片的厚度为 1.3 mm, 对 532 nm 波长光的线性透射率为 2%, 对 632.8 nm 波长光的线性透射率为 50%. 泵浦光和探测光通过聚焦透镜共线输入样品, 通过样品的透射光经单色仪选出 632.8 nm 波长光用光电倍增管接收, 与入射光信号一并送入存储示波器. 选择泵浦光峰值功率密度为 3×10^6 W/cm², 探测光功率密度 0.35 W/cm², 得到的光控光开关的实验结果如图 5 所示, 开启时间为 35 ns, 关闭时间为 600 ns. 此实验结果与以上理论模拟结果完全相符. 逐渐改变泵浦光峰值功率密度, 得到有泵浦光与无泵浦光时探测光透射率之比随泵浦光峰值功率密度的变化关系, 如图 6 所示. 可见光调制实验结果与图 4 理论曲线也基本相符.

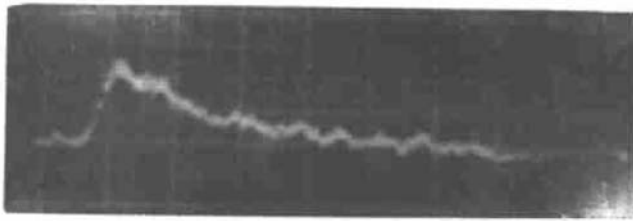


Fig. 5 The result of optical switching using aerosol of Eosin Y, The time division is 100 ns/div, the incident peak power density of pump beam is 3×10^6 W/cm² and the power density of probe beam is 0.35 W/cm², the switching on time is 35 ns, and the switching off time is 600 ns

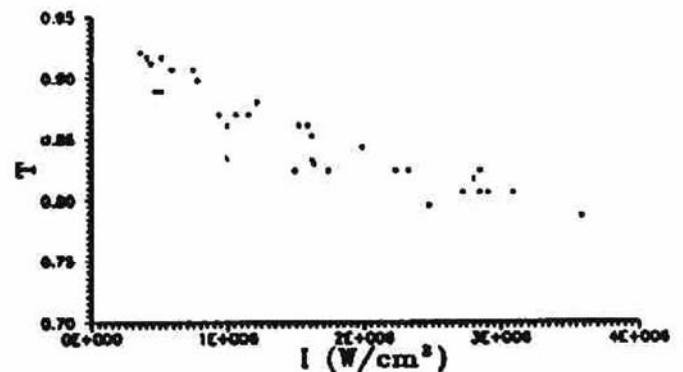


Fig. 6 The experimental result of the ratio of the transimission of probe beam when pump beam is on and off vesus the different incident peak power densities

4 讨 论

本文从理论和实验上证明基于激发态吸收的全光开关与全光调制器是可行的, 但器件的性能指标可通过改进材料结构与性能和激光性能来提高.

对光控光开关, 为提高开关速度, 应选用具有较小 τ_{ST} 的材料和较窄激光脉冲宽度, 以使开启速度提高; 设法减小第一三重态寿命 τ_{T0} , 以使关闭速度提高.

对光调制器, 为提高调制深度, 由公式(4), 也应适当增加样品的厚度与浓度, 选用较大的 σ_T, σ_0 和较小 τ_{ST} , 但由公式(4)可见, 厚度过大会降低调制深度, 必须适当选取.

激发态吸收是纯电子机制效应, 由于避免了 F-P 腔的使用, 不受腔建立时间的限制, 器件速度有望得到提高, 且结构简单. 激发态吸收是在材料线性吸收较小的波长起作用, 可使器件能耗降低.

参 考 文 献

- [1] K. W. Beason, J. T. Yardley, S. Speiser, All-optical switching by organic nonlinearly absorbing molecules. *Proc. SPIE*, 1990, **1337**: 364~371
- [2] H. M. Gibbs, *Optical Bistability—Controlling Light with Light*, Academic Press, Inc., New York, 1985
- [3] S. Speiser, C. Dantsker, M. Orenstein, Spatial light modulation by nonlinear absorbers. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(1): 61~68
- [4] I. Carmichael, G. L. Hug, Triplet-triplet absorption spectra of organic molecules in condensed phases. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **15**:1~250

All-Optical Switching with Eosin Y Aerosol Utilizing Excited-State Absorption

Yang Miao Si Jinghai Li Chunfei

(*Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006*)

Li Tiankai Shen Jifeng Shen Yuquan

(*Institute of Photochemistry, Academia Sinica, Beijing 100101*)

(Received 5 April 1993; revised 31 May 1993)

Abstract All-optical switching and modulation based on the excited-state absorption in a slice of Eosin Y aerosol by using a frequency doubled Nd:YAG pump beam and a He-Ne laser probe beam have been demonstrated. While dynamic numerical simulation using rate equation have been accomplished, which is consistent with experiments. The methods for improving characteristics of optical switching and modulation are also discussed in this paper.

Key words eosin Y, excited-state absorption, all-optical switch.