

基于反饱和吸收的无腔光学双稳态

王 惠

李淳飞 张 雷 王玉晓

(中山大学物理系, 广州 510275) (哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150006)

李亚君

(中国科学院长春物理所, 长春 130021)

摘 要 本文研究有机材料基于反饱和吸收的瞬态无腔光学双稳特性. 以有机材料酞菁铜为例, 理论计算得到了基于反饱和吸收的无腔光学双稳回线. 实验上首次观察到酞菁铜溶液的增强吸收型无腔光学双稳态. 理论计算与实验结果一致.

关键词 反饱和吸收, 光学双稳态, 酞菁铜.

1 引 言

反饱和吸收是一类具有二维或三维 π 电子离域结构的有机材料(如:金属酞菁等)在特定波长的强激光作用下所显示的吸收系数随入射光强的增强而增大的一种非线性光学现象^[1~3]. 由于有机材料的这种非线性光学性质在光通讯、光信号处理和光计算领域里具有重要的应用, 所以, 近年来引起了国外和国内的广泛重视.

本文首次报道有机材料基于反饱和吸收的瞬态无腔光学双稳态研究. 并对实验和理论结果进行了讨论.

2 理论分析

有机材料反饱和吸收的研究证明了介质对入射激光的吸收是通过基态和激发态分子吸收过程来完成. 当入射光功率密度增大时, 基态分子的吸收跃迁的增加使激发态上分子数增加, 由于在激发态吸收峰值波长处, 激发态吸收截面大于基态吸收截面, 所以, 激发态的吸收增加使介质的总的吸收系数也增大. 进一步增大入射光功率密度, 使激发态上的分子数再增加, 从而进一步增大介质的总吸收系数, 因而透射光功率密度相对入射光功率密度呈滞后关系. 当入射光功率密度从最大值减小时, 由于处于激发态的分子数较多, 而且具有较长的寿命, 使介质在一定的入射光功率密度范围内维持对入射激光较高的吸收状态, 直至处于激发态的大部分分子通过衰变回到基态, 这就形成了光双稳回线. 这一动态过程可由一个速率方程来描述:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma_g I/h\nu & 1/\tau_{21} & 1/\tau_{31} \\ \sigma_g I/h\nu & -(1/\tau_{21}) - 1/\tau_{23} & 0 \\ 0 & 1/\tau_{23} & -1/\tau_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为基态，第一激发单态和第一激发三重态上的分子数密度， σ_g 为基态吸收截面， τ_{21} 和 τ_{31} 分别为第一激发单态和三重态上的分子衰变到基态的时间， τ_{23} 为系际交叉跃迁时间。 I 为瞬时入射光功率密度，它通常是时间和入射光在介质中位置 (z) 的函数。光束在介质中的传播规律由 Beer-Lumber 定律可表为：

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = - (n_1 \sigma_g + n_2 \sigma_s + n_3 \sigma_T) I(z,t) \quad (2)$$

式中 σ_s 和 σ_T 分别为第一激发单态和三重态的吸收截面。

对于特定的有机材料，(1)式和(2)式中的各参数一定，则根据初始条件和边界条件：

$$n_1(t = -\infty; z) = N, n_2(t = -\infty; z) = n_3(t = -\infty; z) = 0, I(t, 0) = I \exp[-c(t/\tau_L)^2]$$

式中 N 为总分子数密度， τ_L 为入射光脉冲宽度， c 为一常数。利用微机编程可得在高斯型单脉冲作用时间内(1)式和(2)式的数值解。图 1(a)~(d)是根据有机材料酞菁铜的参数：总分子数密度 $N = 1.4 \times 10^{-5} \text{ M}$ 厚度 $L = 0.5 \text{ cm}$ ，基态吸收截面 $\sigma_g = 2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ，第一激发单态吸收截面 $\sigma_s = 2.7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ，第一激发三重态的吸收截面 $\sigma_T = 2.8 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 。通过理论计算得到的在波长为 532 nm，脉冲宽度为 15 ns；入射光峰值功率密度分别为 10^6 w/cm^2 ， 10^7 w/cm^2 ， 10^8 w/cm^2 和 10^9 w/cm^2 的高斯型脉冲作用下，酞菁铜的瞬时入射光功率密度和透射高斯密度随时间的变化关系曲线。图 2(a)~(d)是对应于图 1(a)~(d)中不同的峰值功率密度的瞬时透射光功率密度随入射光功率密度的变化关系曲线。从图 1(a)~(d)可以看出，随着入射光峰值功率密度的增加，透射光脉冲的峰逐渐明显地超前于入射光脉冲的峰，显示出增强吸收型反环双稳特性逐渐增强的现象。双稳态开关时间为 ns 量级。

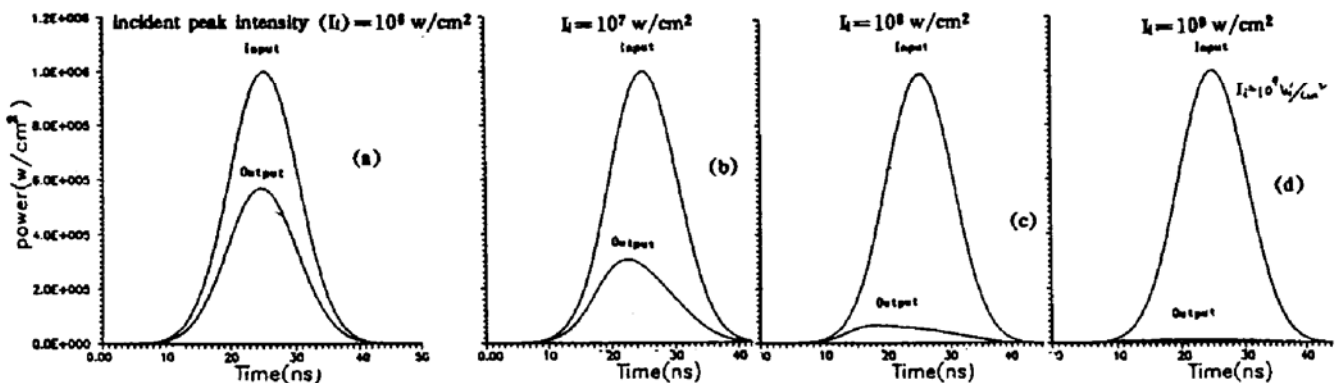


Fig. 1 Input and output pulse from the theoretical calculation for CuPc

图 2(a)~(d)所示和增强吸收型双稳回线的形状依赖于入射光峰值功率密度的大小。随着入射光峰值功率密度的增大，介质的反饱和吸收系数增大，由此产生的光学双稳态也更明显。所有的双稳回线都没有显示出很快的开启和关闭过程，这可能与分子在激发态的寿命，吸收截面，介质的厚度和入射激光的脉宽有关。与 Speiser^[4] 和 Garito^[5] 的工作进行比较发现，这种基于反饱和吸收的无腔光学双稳回线的形状与置入 F-P 腔中的荧光素和 silicon raphthal-cyanine oligomers (SINL) 聚合物所显示的增强吸收型和饱和吸收型的光学双稳回线的形状基本相同，这说明了这种无腔光学双稳回线的形状与产生的机制无关。

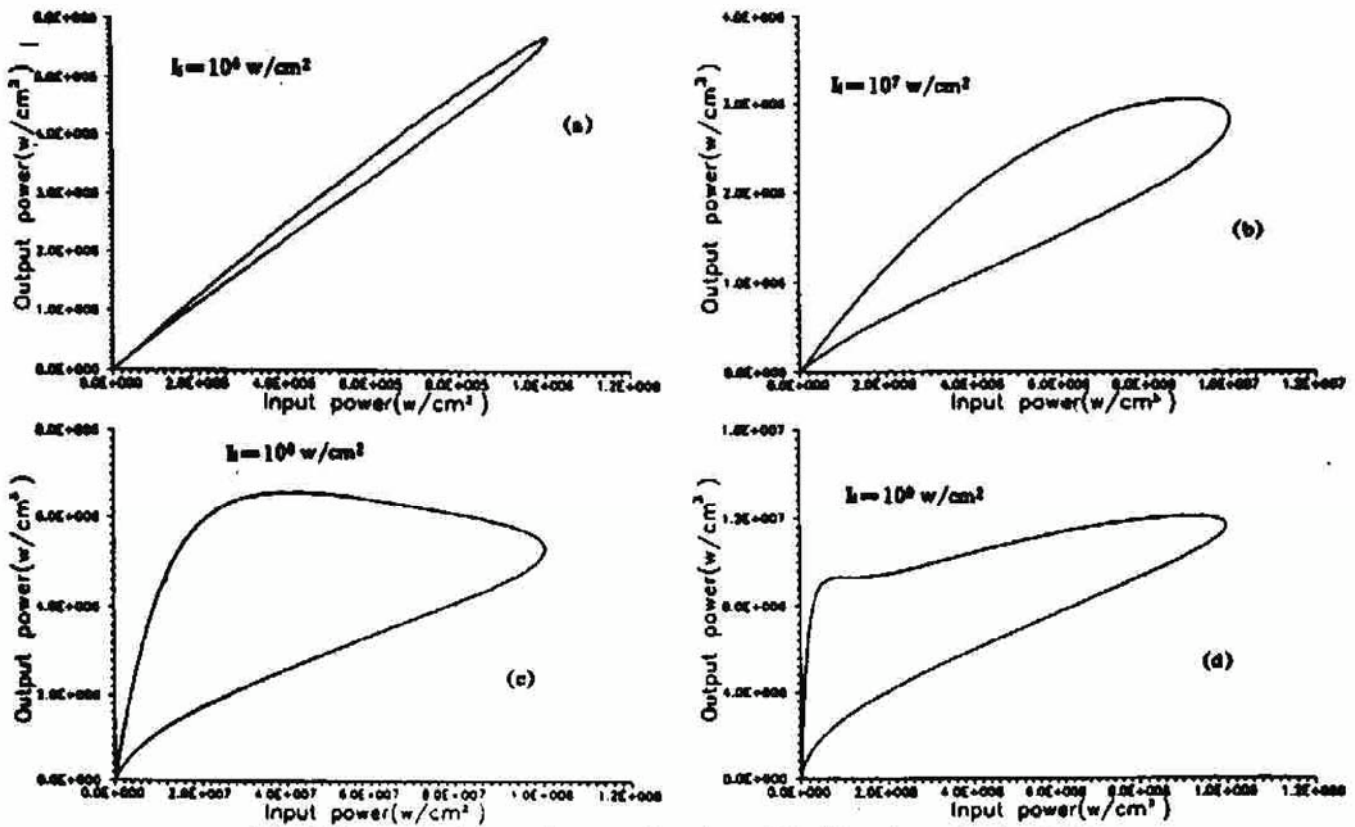


Fig. 2 Transmitted intensity as a function of incident intensity for CuPc

3 实验结果和讨论

为了验证上述理论的正确性. 实验用一台 Nd : YAG 调 Q 倍频激光器作为光源, 在波长为 532 nm, 脉宽为 15 ns 和入射光峰值功率密度约为 10^7 w/cm^2 的实验条件下, 测量了浓度为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ M}$ 的酞菁铜溶液在单脉冲作用时间内瞬时透射光功率密度随入光功率密度的变化关系. 测量方法参见文献[3]. 图 3 显示了激光的入射光脉冲和经过酞菁铜溶液(厚度为 0.5 cm)的透射光脉冲. 图 4 是根据图 3 描出的入射和透射光脉冲.

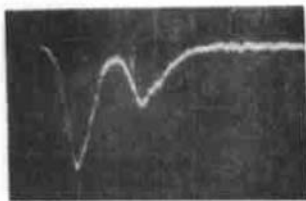


Fig. 3 Input and output pulse photographs of CuPc solutions under 10^7 w/cm^2 incident peak intensity

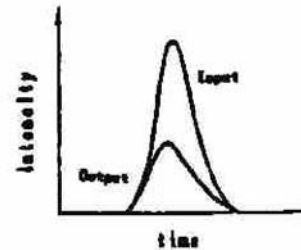


Fig. 4 Input and output pulse shapes according to Fig. 3

从图 3 和图 4 可以明显看出透射光脉冲的峰超前于入射光脉冲的峰, 脉冲的形状与图 1 (b)所示的脉冲形状基本一致. 证明了酞菁铜基于反饱和吸收的无腔增强吸收型光双稳特性. 利用这一结果可以解释用酞菁铜 LB 膜作为覆盖层所观察到的四层介质波导的多级双稳特性^[6,7]. 由于在相同的实验条件下, 不覆盖酞菁铜 LB 膜的波导没有显示出双稳特性^[4], 所以, 多层介质波导所显示的光双稳特性是由酞菁铜 LB 膜的光学非线性引起的. 根据光束在波导中的传输原理, 当入射光功率密度较小时, 光束同时在酞菁铜 LB 膜和波导中传输, 这是因为酞菁铜 LB 膜的线性折射率 ($n_s = 1.537$) 大于波导层的线性折射率 ($n_f = 1.51$). 随着入射光功率密度的逐渐增大, 酞菁铜 LB 膜的吸收系数增大. 根据 $k-k$ 关系由此产生的非线性折射率使总折射率减小. 当 $n_s < n_f$ 时, 入射光仅在波导层中传输, 这时瞬时透射光功率密度正如文

献[7]中图 3(b)所示突然增大. 此外, 不同的导模实现光双稳的阈值也有所不同. 当入射光功率密度从最大值减小时, 由于酞菁铜的反饱和吸收导致透射光功率密度的减小. 介质波导的多稳回线的形状与覆盖层和波导层的性质以及两者之间的相互作用有关.

结 论 本文以有机材料酞菁铜为例, 从理论上和实验上研究了基于反饱和吸收的无腔瞬态光学双稳态, 得出以下结论:

1) 有机材料的反饱和吸收能导致无腔增强吸收型光学双稳态的实现, 反饱和吸收越强, 则双稳态越明显. 由于这种无腔光学双稳态来源于此电子机制, 所以, 开关时间(ns 量级)比由热机制所致的无腔光学双稳态的开关时间(ms 量级)要短得多^[8]. 此外, 采用激发态寿命短的材料可提高开关速度.

2) 有机材料的反饱和吸收能用于介质光波导的快速光学开关.

总之, 基于反饱和吸收的无腔光学双稳态的研究还刚刚开始, 进一步的研究有助于发展一种新型的非线性光学器件.

参 考 文 献

- [1] L. W. Tutt, S. W. McCahon, Reverse saturable absorption in metal cluster compounds. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(12): 700~702
- [2] W. Blau, H. Byrne, W. M. Dennis *et al.*, Reverse saturable absorption in tetraphenylporphyrins. *Opt. Comm.*, 1985, **56**(1): 25~29
- [3] 李淳飞, 王惠, 杨森等, 酞菁铜非共振反饱和吸收和稳态特性研究. *光学学报*, 1993, **13**(3): 219~223
- [4] S. Sperser, F. L. Chisena, Optical bistability in fluorescein dyes. *Appl. Phys. (B)*, 1988, **45**: 137~144
- [5] A. F. Garito, J. W. Wu, Optical bistability in random glassy polymers. *Proc. SPIE*, 1989, **1147**: 2~11
- [6] 范俊清, 李亚君, 吕安德等, 酞菁铜 LB 薄膜复合光波导的高速双稳特性. *光学学报*, 1992, **12**(6): 562~564
- [7] Y. J. Li, J. Q. Fan, A. D. Lu *et al.*, Optical bistability of an optical waveguide coated with nonlinear Langmuir-Blodgett films. *Thin Solid Films*, 1992, **210/211**: 156~159
- [8] D. A. B. Miller, A. C. Gossard, W. Wiegmann, Optical bistability due to increasing absorption. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(5): 162~164

Mirrorless Optical Bistability due to Reverse Saturation Absorption

Wang Hui

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou, 510275)

Li Chunfei Zhang Lei Eang Yuxiao

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

Li Yajun

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica, Changchun, 130021)

(Received 22 March 1993; revised 16 July 1993)

Abstract Mirrorless transient optical bistability due to reverse saturation absorption in organic materials has been studied. Optical bistability loops have been obtained from theoretical calculation for copper phthalocyanine (CuPc). Increasing absorption optical bistability has been observed in CuPc solutions. Theory and experiments show good agreement.

Key words reverse saturation absorption, optical bistability, copper phthalocyanine.