

负非线性夹层式光开关原理

高艳霞 贺渝龙 是度芳
(华中理工大学物理系, 武汉 430074)

摘 要 根据光致热效应讨论了负非线性夹层式光开关的时间响应特性。利用热传导方程和两个热力学方程, 在绝热假设下分析了影响其全反射响应时间的因素, 应用这一理论模式对 Strobl 提出的样品材料进行了计算, 理论与实验结果相吻合。

关键词 负非线性光学效应, 光开关, 响应时间。

采用负非线性介质作为夹层组成的光开关具有阈值光强低、对比度高和快速隔断的特性, 可用为快速全光开关和光学逻辑元件, 在光计算与光通讯等领域中具有潜在的应用^[2, 3, 6]。

1 光开关基本原理

本文讨论的光开关模型如图 1 所示。它是由非线性介质薄层 3 夹在线性介质 1, 2 之间组成的。激光入射以前, 使其折射率互相匹配: $n_1 = n_2 = n_3 = n_0$ 。当激光掠入射到 3 的第一界面(图中 A 面)上时, 由于光致热效应, 介质 3 的折射率将发生变化, 设其变化为 Δn , 变化后的折射率 n_3 可表示为:

$$n_3 = n_0 + \Delta n \quad (1)$$

如果介质 3 是具有较高光热转换性能的负非线性介质, A 面上将发生负非线性效应, Δn 小于零, $n_3 < n_0$, 对于特定的介质 3, 当入射光强达到一定值致使 Δn 的绝对值大于一定特定的临界值 Δn_{th} 时, 在非线性质 3 的第一个界面(A 面)上就会产生全反射, 完全隔断透射光。根据折射定律: 对一定的掠射角 φ , 介质 3 产生全反射条件为:

$$\Delta n_{th} \geq |n_0[\cos(\varphi) - 1]| \quad (2)$$

因此唯有负非线性介质且 $|\Delta n| \geq \Delta n_{th}$ 时, 才能产生全反射, 实现开关的目的。

理论和实验研究均表明^[2, 7], 引起介质折射率感应变化的主要物理机制有: 1) 光克尔效

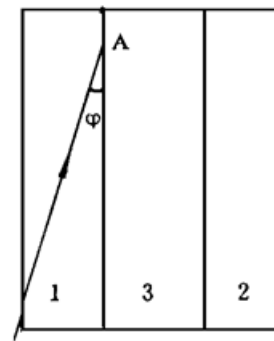


Fig. 1 Principle of negative nonlinear intercalation photoswitch

应; 2) 电子云畸变效应; 3) 电致伸缩效应; 4) 热效应。考虑以脉宽为纳秒级的脉冲激光作用, 热效应是最大也是最容易产生的非线性光学效应, 在较低光强下可超过前两种效应, 所以 1)、2) 两种效应可以忽略^[5], 在本文以下的讨论中只考虑 3)、4) 两项。

2 理论分析

设想将脉冲激光束聚焦于介质 3 的第一个表面上, 光强为 I , 在光照射的小焦柱体内, 由于非线性介质对入射光能的吸收通过无辐射跃迁转变为热能, 热膨胀引起密度变化。在绝热假设下, 由于密度变化(用 $\Delta\rho$ 表示)、温度变化(用 ΔT 表示) 导致的折射率变化为:

$$\Delta n = (\partial n / \partial T) \Delta T + (\partial n / \partial \rho) \Delta \rho \quad (3)$$

其中 $\partial n / \partial T$ 、 $\partial n / \partial \rho$ 在温度变化不大的情况下, 可视为常数, 令: $\partial n / \partial \rho = M$, $\partial n / \partial T = N$ 。设研究的是连续介质, 以高斯光 TE₀₀ 模入射, 其光强用下式表示: $I(r) = I_0 \exp - (2kr^2/b)$, $b = kr_0^2$, r_0 为入射光的高斯半径。作为出发点的方程是关于密度、温度以及质量元和速度的连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\text{Nanier-Stokes 方程: } \rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + v^2 \nabla (\Delta \rho) + v^2 \beta_T \rho_0 \nabla (\Delta T) - \eta \nabla^2 \mathbf{v} = \frac{\gamma}{8\pi} \nabla I(r)$$

$$\text{及热传导方程: } \rho_0 C_p \frac{\partial (\Delta T)}{\partial t} - \lambda_T \nabla^2 (\Delta T) = \frac{nc\alpha}{8\pi} I(r)$$

$$\text{整理得: } - (\Delta \rho) + v^2 \nabla^2 (\Delta \rho) + v^2 \beta_T \rho_0 \nabla^2 (\Delta T) + \frac{\eta}{\rho_0} \frac{\partial [\nabla^2 (\Delta \rho)]}{\partial t} = \frac{\gamma}{8\pi} \nabla^2 I(r) \quad (4)$$

$$\rho_0 C_p (\Delta T) - \lambda_T \nabla^2 (\Delta T) = \frac{nc\alpha}{8\pi} \nabla^2 I(r) \quad (5)$$

其中: $\Delta \rho = \rho - \rho_0$ 、 $\Delta T = T - T_0$, ρ_0 、 T_0 分别为激光入射前介质 3 的密度和温度。 α 、 β_T 、 λ_T 、 γ 、 η 分别为非线性介质的吸收系数、热膨胀系数、热传导系数、电致伸缩系数和衰减系数, C_p 为定压比热, c 为光速。根据前面的光强表达式则有:

$$\nabla^2 I(r) = q^2 I(r)$$

$$q^2 = (16r^2 - 12r_0^2)/r_0^4 \leq 0, \quad r \in [0, \sqrt{3}r_0/2] \quad (6)$$

因为入射光强有空间上的分布, 中心处最强, 所以样品折射率的变化也具有相应的分布, 因而可以把温度变化 ΔT 、密度变化 $\Delta \rho$ 分离变量, 用 $W(t)$ 表示 ΔT 的时间因子, 用 $D(t)$ 表示 $\Delta \rho$ 的时间因子:

$$\Delta T = W(t) I(r), \quad \Delta \rho = D(t) I(r) \quad (7)$$

将(7)式代入(4)、(5)两式则有:

$$W(t) - \left[\frac{\lambda_T q^2}{\rho_0 C_p} + \frac{Nc\alpha}{8\pi\rho_0 C_p} I(r) \right] W(t) = \left[\frac{nc\alpha}{8\pi\rho_0 C_p} + \frac{Mc\alpha}{8\pi\rho_0 C_p} I(r) \right] D(t) \quad (8)$$

$$D(t) - \frac{\eta q^2}{\rho_0} D(t) - v^2 q^2 D(t) = v^2 q^2 \beta_T \rho_0 W(t) - q^2 \frac{\gamma}{8\pi} I(r) \quad (9)$$

本文采取迭代的方法解这个方程组。

若非线性介质为吸收系数大、热膨胀系数较大的材料^[1, 4], η 的值可达泊(P) 的数量级 [泊的量纲为: 达因·秒/厘米²(dyn·s/cm²)], $v \sim 1.6 \times 10^3$ 、 $\lambda_T \sim 3.08$ 、 $\rho_0 \sim 0.98 \times 10^3$ 、

$n_0 \sim 1.51947$ 、 $r_0 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $C_p \sim 1.88 \times 10^2$ 、 $\beta_p \sim 8 \times 10^{-5}$ 、 $(\partial n/\partial T) \sim 10^{-6}$ 、 $(\partial n/\partial \rho) \sim 10^{-4}$ 、 $\alpha \sim 5000$ 、 $q^2 \sim -4 \times 10^{12}$; (说明: 凡未标明单位的均采用国际单位制), 所以 $Nc\alpha I(r)/8\pi\rho_0 C_p$ 比 $-\lambda_T q^2/\rho_0 C_p$ 要小得多, 可略去。

令: $\Gamma_R = -\lambda_T q^2/\rho_0 C_p$ 、 $\Gamma_B = -\eta q^2/2\rho_0$, 则对应的齐次方程的通解表示为:

$$D^0(t) = A \exp(-\Gamma_B t) \cos(\Omega t) \quad (10)$$

式中 $\Omega = \sqrt{-q^2 v^2 - \Gamma_B^2}$, 根据前述参数: $-q^2 v^2 \gg \Gamma_B^2$, 所以可取: $\Omega = |qv|$ 将(10)式代入(9)式, 利用 $\Omega^2 \gg \Gamma_R^2 \gg \Gamma_B^2$ 及初始条件 $W(t=0) = 0$, 得:

$$W^0(t) = c\alpha n_0 [1 - \exp(-\Gamma_R t)] + cAM\alpha I(r) \sin(\Omega t) \exp(-\Gamma_B t) \quad (11)$$

令(8)式的通解为: $D(t) = D^0(t) + P + S \exp(-\Gamma_R t)$ (12)

将(10)、(11)、(12)式代入(8)式中, 利用 $\Omega^2 \gg \Gamma_R^2 \gg \Gamma_B^2$ 得:

$$S = \beta_T n_0 c \alpha / 8\pi \Gamma_R C_p, \quad P = (\mathcal{Y}^e / 8\pi w^2) - (\beta_T n_0 c \alpha / 8\pi \Gamma_R C_p), \quad (13)$$

另外根据初始条件 $D(t=0) = 0$ 得: $A = -\mathcal{Y}^e / 8\pi w^2$, 则(3)式可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta n &= I(r) \{ c_1 [1 - \exp(-\Gamma_R t)] + c_2 \sin(\Omega t) \exp(-\Gamma_B t) \\ &\quad + c_3 [1 - \cos(\Omega t) \exp(-\Gamma_B t)] \} \\ &= \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 \end{aligned} \quad (14)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_1 &= c_1 I(r) [1 - \exp(-\Gamma_R t)], & \Delta n_2 &= c_2 I(r) \sin(\Omega t) \exp(-\Gamma_B t), \\ \Delta n_3 &= C_3 I(r) [1 - \cos(\Omega t) \exp(-\Gamma_B t)] & c_1 &= n_0 c \alpha [(N - M \rho_0 \beta_T) / 8\pi \rho_0 C_p \Gamma_R], \\ c_2 &= c \alpha \mathcal{Y}^e / (8\pi w)^2 \rho_0 C_p \Omega, & c_3 &= m \mathcal{Y}^e / 8\pi w^2. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3 讨 论

1) 利用(14)式代入前述参数可知, $c_1 < 0$ 、 $\Gamma_R > 0$ 、 $\Gamma_B > 0$ 、 $c_2 > 0$ 、 $c_3 > 0$, 由于 $c_1/c_2 \sim -10^9$ 、 $c_1/c_3 \sim -10^3$, 所以 $|\Delta n_1| \gg \Delta n_2 + \Delta n_3$, 由此知 Δn 主要由 Δn_1 决定, $\Delta n \approx \Delta n_1 < 0$ 。这说明在非线性介质3的第一界面(图1中的A面)上发生的是负非线性效应。当 Δn 的下降量达到 Δn_{th} 时, 就会立即产生全反射, 隔断透射光, 实现“开关”功能。

2) 从 Δn 的表达式可以看到; 第一项描述的是由于热膨胀引起的密度变化项, 从它的系数 c_1 受来自于温度变化 $W^0(t)$ 的制约可以估计: 在一定的温升下, 密度变化的大小是有一定限度的。第二项描述的是密度、温度耦合效应。它表征的是一个快速衰减的声频振荡过程, 振荡频率为: $\Omega = |qv| \sim 2 \times 10^9 \text{ Hz}$, 衰减常数为: $\Gamma_B^{-1} \approx 10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ sec}$ 。最后一项描述的是电致伸缩引起的密度变化项。从(14)式可知, 在它的变化过程中, 受一声波的调制, 调制频率为: $\Omega = |qv| \sim 2 \times 10^9 \text{ Hz}$ 的量级, 它的衰减常数就是 $\Gamma_B^{-1} \approx 10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ sec}$, 所以第三项反映的是电致伸缩引起很快衰减的密度波的小振荡过程。估计这种行进波仅仅在入射光很强、检测器时间分辨率高的条件下, 才能观察到。

3) 由结论1)、2)可以看到: $\Delta n \approx \Delta n_1 < 0$, 在激光作用下折射率变化由 $0 \rightarrow \Delta n$ 响应时间决定于 Δn_1 的时间常数 Γ_R , 由 Γ_R 的表达式可知, 它主要取决于介质的热传导特性和光束截面(式中 q^2 项), 因而提高响应时间的主要途径是选用热传导系数大的材料和缩小入射光斑尺寸。代入上述参数计算 Γ_R^{-1} 为 10^{-9} sec , 说明响应时间为纳秒量级。

4) 电致伸缩效应的贡献((14)式中第三项), 在 Δn 的变化过程中是很小的, 是可以忽略的, 因此可以得出结论: 在负非线性介质的第一界面上产生负非线性效应的主要机制是光致热效应, 其响应时间为纳秒量级, 这一结果与 Strobl 的实验结果相一致^[1, 3]。

5) 本文讨论的光开关是利用夹层介质的折射率变化产生全反射来实现“开关”功能的。当用达到阈值光强的激光照射时, 立即在介质 3 的第一个界面上产生全反射隔断透射光, 这相当于开关的“断开”, 时间间隔为纳秒量级。切断激光后, 开关“接通”的时间主要由热扩散来决定, 近似可表示为: $t = \rho_0 C_p (2r_0)^2 / 4\lambda_T$, 代入上述参数计算为微秒量级, 这比人眼感受到外界刺激的时间(0.01 s)还低三个数量级, 经过这段时间后全反射条件不成立, 开关立即恢复到透明状态, 因此这种夹层式光开关的对比度是非常高的。

由前面分析可知, Δn 主要由光强 $I(r)$ 和系数 c_1 决定。 c_1 与选择的介质有关, 理论上讲, 只要选取合适的非线性介质就可以使阈值光强很低且是单阈值的。另外这种负非线性夹层式光开关的响应时间取决于介质 3 的折射率变化的快慢, 由上面分析可知为纳秒量级。综上所述: 负非线性夹层式光开关具有对比度高、阈值低、快速的优点, 它必将在光通讯、光计算中发挥巨大的作用。

参 考 文 献

- [1] K. Strobl, All-optical switching of reflectivity and transmissivity by a nonlinear. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(6) : 1435~ 1438
- [2] 沈元壤, 非线性光学. 北京, 人民教育出版社, 1976 : 160~ 187
- [3] K. H. Strobl, Single step switching at a nonlinear interface. *Phys. Rev. (A)*, 1989, **40**(9) : 5143~ 5146
- [4] A. E. Kaplan, Hysteresis reflection and refraction by a nonlinear boundary—a new class of effects in nonlinear optics. *JEPT Lett.*, 1976, **24**(2) : 115~ 117
- [5] 丁广良, 贺渝龙, 是度芳等, 向列相液晶中热致相位光栅的研究. 华中理工大学学报, 1989, **17**(5) : 153~ 156
- [6] I. C. Khoo, J. Y. Hou, Laser-induced thermal, orientational and density nonlinear optical effects. *Phys. Rev. A.*, 1990, **42**(2) : 1001~ 1004
- [7] 刘颂豪, 赫先生, 强光光学及其应用, 广州, 广东科技出版社, 1995 : 48~ 60

Principle of Negative Nonlinear Intercalation Photoswitch

Gao Yanxia He Yulong Shi Dufang

(Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 15 November 1995; revised 12 February 1996)

Abstract The time response characteristics of negative nonlinear intercalation photoswitch are discussed based on the photo-induced thermal effect. Under the adiabatic assumption the thermal conductivity equation and two other thermodynamics equations are applied to analyses the factors that influence its total internal reflection response time. With this theoretical model the materials referred by Strobl are calculated.

Key words negative nonlinear optical effect, photoswitch, response time.