

光学多稳态系统及频率特性

李海, 刘金龙, 熊万杰, 刘慧

(华南农业大学 理学院, 广东 广州 510642)

摘要:从光学多稳态及放大的普适动力学模型和聚丁二炔的非线性极化率出发,着重数值分析了阶跃脉冲高度对光学多稳态动态特性的响应以及与频谱的关系。通过数值分析可以看出,不同的输入脉冲高度,影响多稳态输出,要得到稳定输出,必须选择合适的激发脉冲强度。讨论了无注入信号的激光稳态输出条件及其频率牵引效应。这些研究结果对这种材料的激光多稳态器件具有重要意义。

关键词:光学多稳态;三能级系统;动态响应;非线性极化率;频率牵引

中图分类号:O431; O437

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2008)02-0118-04

The Nonlinear Optical Multi-Stable System and Characteristics of Frequency

LI Hai, LIU Jin-long, XIONG Wan-jie, LIU Hui

(College of Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, china)

Abstract: According to the generalized model of the optical multi-stable and the nonlinear susceptibility of the polydiacetylenes(PDAs), the relationship between the transient course and the characteristics of frequency is discussed at different impulse intensity. Numerical analysis showed that the intensity of impulse intensity step signal affects the output signal. An appropriate impulse intensity must be chosen to obtain the stability output. The condition of laser system and its frequency pulling effect were analysed without incident driving field. The results obtained should be of certain significance for understanding organic polymer optical multi-stable lasing devices.

Key words: optical multi-stability; three level system; transient response; nonlinear susceptibility; frequency pulling

近几年,有机物光子材料的非线性光学特性的研究引起广泛关注,尤其是双光子激光(TPL)材料。聚丁二炔(PDAs)是其中一种比较典型的非线性光学材料,目前已经知道这种材料在近红外区有强的双光子吸收,在强光作用下,该材料的极化率表现出极强的非线性,其材料的极化率可以用一种特殊的三能级系统来描述^[1]。当前对PDAs的研究主要在光学多稳态的静态特性和部分动态特性方面,分析光学多稳态的热力学势和临界现象^[2-4];并运用光学双稳态的强迫振动模型探索PDAs系统发射TPL的条件^[5]。光学双稳态和多稳态装置是构成光计算机

最为基本的系统,因此对于有机高聚合物的光学多稳态动态响应特性和频率特性的研究具有重要意义。本文基于动力学模型和三能级系统非线性极化率,主要通过数值计算分析了带入射信号系统激光放大系统的光学多稳态的动态特性、位相动态特性和频率特性。以期为开发这种材料的多稳态器件提供一定的理论基础。

1 非线性极化率与动力学模型简化

PDAs非线性有机光学材料,其物理特性可以用一个特殊的三能级系统来描述^[1]。运用光学布洛赫

(Bloch)方程和密度矩阵可以得到非线性极化率的表达式:

$$\chi_{\omega}(I) = x_0 \frac{(\Delta_2 + i\gamma)I/I_s + (1 - \gamma/\Gamma)\omega_s(I/I_s)^2}{\gamma^2 + (\Delta_2 + \omega_s I/I_s)^2 + (\gamma I/I_s)^2}, \quad (1)$$

其中: χ_{ω} 代表这种有机光学材料非线性极化率; x_0 与激活分子数成正比; I_s 为饱和光强, I 是与 I_s 对应的输出光强, ω_s 为stark频率; $\Delta_2 = \omega_{20} - 2\omega$ 为双光子失谐量; ω 为近双光子共振场频率; γ 为介质的驰豫率, Γ 为场模衰减率.

运用光学双稳态的非线性受迫振动模型^[2]可以描述这种有机材料的动态特性,其动态方程可以写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = -(1 + \chi_2/a)x + y \sin \phi, \\ \dot{x}\phi = (\theta - \chi_1/a)x + y \cos \phi, \end{cases} \quad (2)$$

其中: y 正比于输入场振幅, x 正比于激发场振幅, ϕ 是 x 和 y 之间的位相差,也就是光场的慢变位相; χ_1, χ_2 分别是非线性极化率的实部和虚部,实部代表色散,虚部代表吸收; θ 代表腔的失谐量,其中 $\theta = 2\Delta_1/\gamma_b$, $\Delta_1 = (\omega - \Omega)$ 代表原子失谐; γ_b 是腔的驰豫, Ω 是腔固有频率; a 是控制参数.

为了便于数值计算,引入如下参数:

$$\begin{aligned} a &= x_0 \frac{\gamma}{\sqrt{(\omega_s^2 + \gamma^2)(\Delta_2^2 + \gamma^2)}}, \\ C &= a\Omega/\gamma_b, I_t = \frac{(\omega_s^2 + \gamma^2)I}{(\Delta_2^2 + \gamma^2)I_s}, \\ \eta &= \frac{2\Delta_2\omega_s}{(\omega_s^2 + \gamma^2)(\Delta_2^2 + \gamma^2)}, \delta = \Delta_2/\gamma, \\ D &= \omega_s(1/\gamma - 1/\Gamma) \sqrt{\frac{\Delta_2^2 + \gamma^2}{\omega_s^2 + \gamma^2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中: Ω 是腔固有频率; η 与材料的特性相关; D 与材料近双光子共振场频率、介质的驰豫率、场模衰减率相关; I_t 是输出光强.

可以将动力学方程简化如下:

$$\begin{cases} \dot{X} = -(1 - \frac{CI_t}{1 + \eta I_t + I_t^2})X + Y \sin \Phi, \\ \dot{Y} = [\theta - \frac{C(\delta I_t + DI_t^2)}{1 + \eta I_t + I_t^2}]X + Y \cos \Phi, \end{cases} \quad (4)$$

其中: X, Y 分别正比于输出场、输入场的振幅, δ 代表原子失谐, C 参数代表被动吸收,必须为负值,否则没有激光产生,所以可以用增益参数 $g = -C$ 代替式(4)中的参数, Φ 是 X 和 Y 之间的位相差,也就是光场的慢变位相. 简化完动力学方程后便可以分析光学多稳态的静态曲线和动态特性.

在静态时,输出场和位相不随时间变化,可以从

式(4)中得到静态方程:

$$I_t = I_t \left[\left(1 + \frac{CI_t}{1 + \eta I_t + I_t^2} \right) + \left(\theta - \frac{C(\delta I_t + DI_t^2)}{1 + \eta I_t + I_t^2} \right) \right], \quad (5)$$

式(5)中 I_t 是输入光强,正比于 Y^2 ; I_t 正比于 X^2 ,其光学多稳态静态曲线如图1所示,式(5)中的参数分别是 $\theta = 2$, $\delta = -1.5$, $C = -2$, $D = -1$, $\eta = -1$. 在直线上面静态曲线部分就是光放大区域,下面部分光没有放大,光放大倍数等于1的坐标点分别是 $(I_t, I_t) = (0.308, 0.308), (0.643, 1), (0.643, 1), (5.048, 9), (5.048, 9)$.

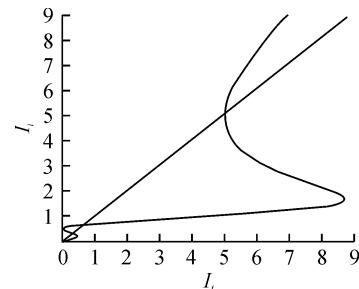


图1 静态多稳态曲线

Fig. 1 The static multi-stable output curve

2 动态特性和频率特性的数值分析与讨论

有光激励时,PDA多稳态系统增益大于损耗和色散,就有激光产生的可能. 在这里主要讨论输入场对输出场动态特性的影响以及相应的频谱特性和位相特性. 通过数值计算发现在静态点上,输入场脉冲的高度对其动态特性和频率特性响应差异比较明显. 任意选定一个静态点 $(I_t, I_t) = (0.3454, 0.09)$ 来比较阶跃脉冲高度对其动态特性和频率特性影响. 通过数值计算可以得知阶跃脉冲高度 Y 在 $(0.466, 1.88, 2.105, 2.24)$ 这几个点差异比较明显.

在 $Y < 0.466$ 时,激发场的动态响应曲线是一个衰减振荡,位相的变化也是一个衰减振荡,最后稳定在一个固定值,在这种情况下,没有实现光放大. 如图2a所示, $Y = 0.465$ 时的动态响应曲线,其相应傅立叶快变频谱如图2b所示.

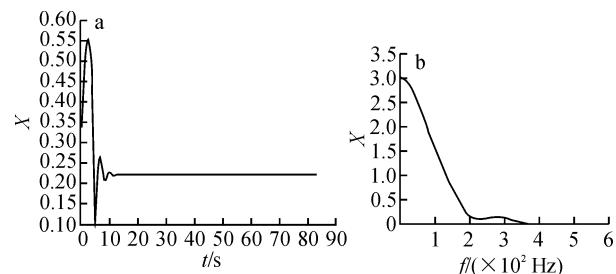


图2 $Y = 0.465$ 的动态变化曲线(a)和相应的频谱曲线(b)

Fig. 2 $Y = 0.465$ the curves of transient response (a) and its spectrum of frequency (b)

当输入场在 $0.466 \leq Y \leq 1.880$ 时,输出场保持在自脉冲振荡,其位相也是振荡特性。 $Y=0.466$ 时,激发场的动态响应曲线如图 3a 所示,其相应傅立叶快变频谱如图 3b 所示,

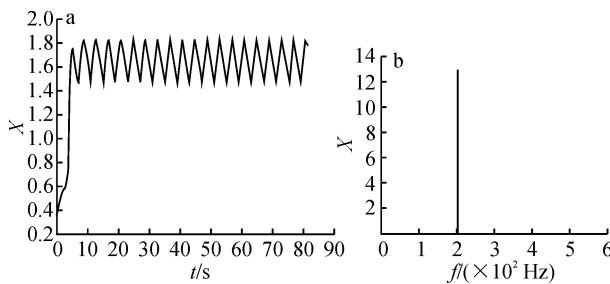


图 3 输入场 $Y=0.466$ 的激发场动态变化曲线(a)和相应的频谱曲线(b)

Fig. 3 $Y=0.466$ the curves of the incident light field of transient response (a) and its spectrum of frequency(b)

在这个区域中,随着输入场强度的增加,将激发出更多的高频和低频成分,这些高频成分与低频有一定的倍率关系,相应的激发场动态曲线也发生变化,输入场自脉冲振荡的振幅和周期变大,如图 4 所示。

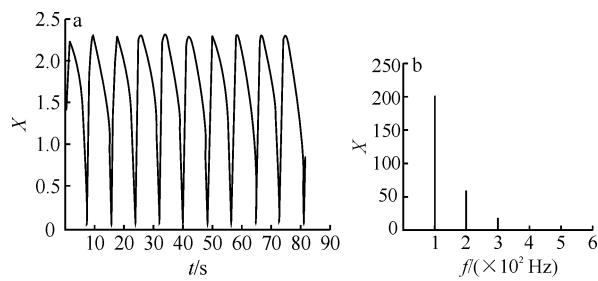


图 4 输入场 $Y=1.880$ 的激发场动态变化曲线(a)和相应的频谱曲线(b)

Fig. 4 $Y=1.880$ the curves of the incident light field of transient response (a) and its spectrum of frequency(b)

当 $1.880 < Y < 2.105$ 时,激发场的动态响应曲线的周期比较混乱(图 5a),其相应的傅立叶快变频谱不再是分离谱,而是一个连续谱(图 5b)。

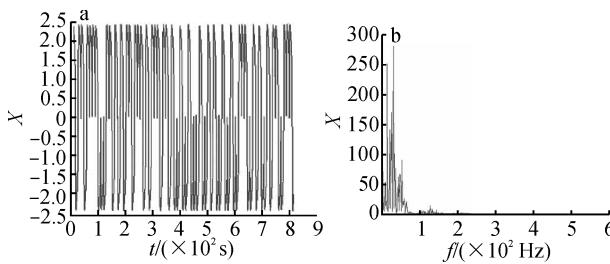


图 5 输入场 $Y=2.0$ 的激发场动态变化曲线(a)和相应的频谱曲线(b)

Fig. 5 $Y=2.0$ the curves of the incident light field of transient response (a) and its spectrum of frequency(b)

当输入场在 $2.106 \leq Y \leq 2.240$ 时,输出场保持在自脉冲振荡,而且其频率分离谱成分非常丰富,说明 PDAs 光学多稳态系统具有比较复杂的频率结构。 $Y=2.240$ 时,激发场的动态响应曲线如图 6a 所示,其相应的傅立叶快变频谱如图 6b 所示。

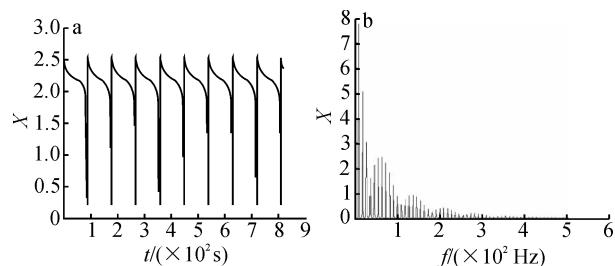


图 6 输入场 $Y=2.240$ 的激发场动态变化曲线(a)和相应的频谱曲线(b)

Fig. 6 $Y=2.240$ the curves of the incident light field of transient response (a) and its spectrum of frequency(b)

当 $Y > 2.240$ 时,激发场跳到 PDAs 多稳态的稳定分支,输出光强比输入场有所放大,激发场随着输入光强的增加输出场光强也增加,但是放大倍数不是很大,其动态响应曲线如图 7a 所示,其相应傅立叶快变频谱不再是分离谱,而是一个连续谱,如图 7b 所示。

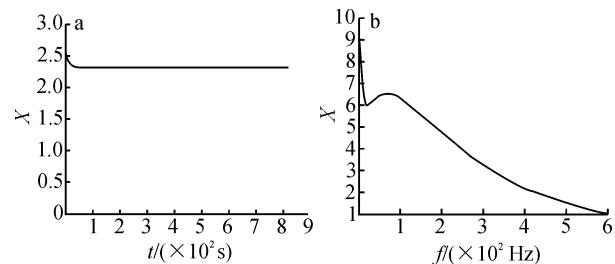


图 7 输入场 $Y=2.250$ 的激发场动态变化曲线(a)和相应的频谱曲线(b)

Fig. 7 $Y=2.250$ the curves of the incident light field of transient response (a) and its spectrum of frequency(b)

如果静态(I_i, I_t)的位置随输出场增大而改变,其动态响应曲线不会出现图 1 所示的衰减振荡,取而代之的是自脉冲振荡,而其他阶跃脉冲的临界高度则不会发生变化,其相应的动态响应曲线和频谱特性也不会发生变化。在自脉冲振荡区域中,随着阶跃脉冲高度的变化自振荡的振幅也随之增大。

3 多稳态激光条件与频率牵引效应

输入场 $I_i=0$,若为被动腔,则不会发生粒子数反转,但对于一般激光器而言,在没有输入场的情况下仍然有激光输出,也就是 $I_i \neq 0$ 。由式(5)可以得到:

$$\theta = -\delta - DI_t, \quad (6)$$

式(6)中,如果参数 $D=0$,就可以得到 $\theta = -\delta$,此时

就由三能级系统过渡到二能级系统,这个等式表明在没有输入场时,要有激光产生必须原子失谐与腔失谐相互牵引,也就是频率牵引效应,如图 8 所示,具体可以参阅文献[4]. 在 PDAs 多稳态系统中 $D = -1^{[2]}$, 就可以得到:

$$\omega_0 = \Omega - \frac{I_t}{2}, \quad (7)$$

从式(7)中可以看出,在三能级系统中由于激发场的作用,系统不会以严格的腔频输出,而是随着激发光强度的增大向低频漂移.

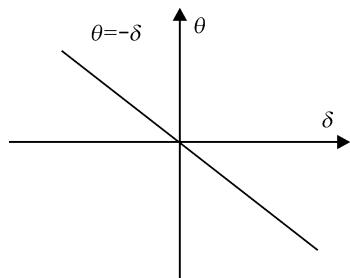


图 8 频率牵引效应

Fig. 8 The curve of the frequency pulling effect

在一般激光条件下,从式(5)中可以得到:

$$I_t = \frac{-(\eta - g) \pm \sqrt{(\eta - g)^2 - 4}}{2}, \quad (8)$$

式(8)中, $g = -C$, C 必须为负值,才有可能实现粒子数反转,所以 g 代表增益. 如果在双光子共振的条件下,也就是 $\eta = 0$,就可以得到激光光强与增益之间的关系,如图 9 所示,从图 9 中可以看出当增益阈值 $g \geq 2$,才有激光输出.

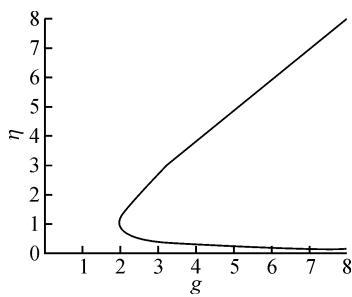


图 9 双光子激光条件

Fig. 9 The condition of two-photon laser

如果 $\eta \neq 0$,有激光输出时,就可以得到激光强度与增益和参数 η 之间的三维图,如图 10 所示. 从图 10 可以看出,增益阈值由于参数 η 的不同而相应发生变化.

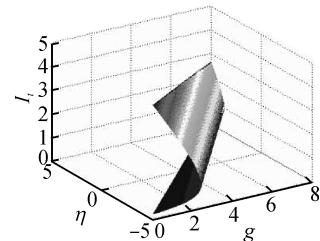


图 10 激光强度与增益 g 和 η 的关系

Fig. 10 The relationship of the intensity of laser and parameters g and η

4 结论

通过上面分析可以得知,在光学多稳态的自振荡区域中,随着输入场脉冲高度的增加,激发频率成分愈丰富,在激发的分离频谱中,越靠近低频部分其强度越强. 通过数值分析可以看出,不同的输入脉冲高度,影响多稳态输出,要得到稳定输出,必须选择合适的激发脉冲强度.

对于多稳态激光条件的分析可见,当增益达到一定水平时,PDAs 光学多稳态系统可能产生激光,腔失谐和原子失谐相互牵引,并随着激发激光强度的增加激光频率漂移.

参考文献:

- [1] NUNIZI J M , CHARRA F. Nonlinear optics-principles materials phenomena and devices [R]. Tokyo: EdT. Kokayaski Gordon and Breach Science Publish,1991.
- [2] WU Ting-wan. Multi-stability and lasing effect in a polymer nonlinear optical system [J]. SPIE , 1996 , 2896 (Supplement):9-18.
- [3] WU Ting-wan. The transient of a polymer optical multi-stable syetem [J]. SPIE , 1998 , 3554 (Supplement):262-270.
- [4] 吴庭万,张晓东.带泵浦的光双稳态系统的激光阈值条件[J].华南理工大学学报,1990,18(1):52-56.
- [5] 吴庭万.一种高聚物双光子激光[J].内蒙古工业大学学报,1998,17(4):28-32.
- [6] OU Fa, WU Ting-wan,ZHANG Xiao-dong. The forced oscillation model of optical bistability[J]. Acta Optica Sinica , 1988 , 8(3):205-211.

【责任编辑 李晓卉】