

二维光致异构光孤子传输特性的研究

陈顺芳, 徐四六*

湖北科技学院电子与信息工程学院, 湖北 咸宁 437100

摘要 基于角度烧孔模型研究光致异构空间光孤子的形成条件和传输性质。在有背景光条件下, 利用 MATLAB 仿真研究折射率随光强的变化关系。根据折射率的变化规律, 分析形成孤子的条件。结果表明: 在有背景光时, 折射率改变可正可负, 可形成亮孤子和暗孤子。

关键词 非线性光学; 光致异构; 偶氮苯聚合物; 角度烧孔; 空间光孤子

中图分类号 O431.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050601

Transmission Characteristics of Two-Dimensional Optical Soliton Through Photoisomerization

Chen Shunfang, Xu Siliu

School of Electrical and Information Engineering, Hubei University of Science and Technology, Xianning, Hubei 437100, China

Abstract Based on the angle hole burning model, the transmission characteristics and formation condition of spatial optical soliton through photoisomerization are studied. Under the background light, the relationship between the refractive index and the light intensity is studied by MATLAB. According to the change law of refractive index, the forming conditions of soliton are discussed. The results show that the refractive index change can be positive or negative with the background light, and the bright soliton and dark soliton can be formed.

Key words nonlinear optics; photoisomerization; azobenzene polymer; angular hole burning; spatial optical soliton

OCIS codes 060.4370; 060.5530; 060.4510; 140.3460

1 引言

孤子, 又称孤立波, 是一种特殊的超短脉冲, 或者说是一种在传播过程中保持形状、速度、幅度不变的脉冲状行波^[1]。由于孤子具有的这些特性, 孤子系统在现实世界有较大的应用潜力^[2]。因此, 目前关于孤子形成及其传输特性的研究是一个热点课题^[3-8]。

近年来, 偶氮苯等有机生色团聚合物的光致异构非线性效应形成的空间孤子一直是研究的热点^[9-16], 人们对它们的各种独特的性质(如相互作用、稳定性)进行了大量研究。含有偶氮苯等有机生色团的聚合物的光致异构非线性效应形成的光学空间孤子称为光致异构聚合物空间孤子。苯环通过

氮-氮双键连接而成的化合物叫做偶氮苯化合物。在偶氮苯等有机生色团的聚合物中, 生色团分子可以分为两种异构体: 顺态(cis态, 顺式态)、反态(trans态, 反式态)异构体。在没有光照的条件下, 聚合物中的分子大多处于反式态。而在能够被聚合物吸收的光的照射下, 反式态和顺式态的异构体分子可以相互转化, 这种转化被称作光致顺反异构, 是光致异构的一种。对同一波长的光, 顺式态和反式态异构体对应不同的折射率, 因此, 光照可使折射率发生变化^[10,12]。

这种效应涉及的现象是微观的, 比较复杂, 目前尚无普适的理论模型来描述它。但是, 这种效应已用许多唯象的理论模型来描述^[10-12]。尼科洛娃等发现的角度烧孔理论可定性地描述反式态和顺式态相

收稿日期: 2017-09-26; 收到修改稿日期: 2017-10-12

基金项目: 湖北省自然科学基金(2015CFC779)

作者简介: 陈顺芳(1974—), 女, 本科, 实验师, 主要从事光通信和物理学方面的研究。E-mail: 645001152@qq.com

* 通信联系人。E-mail: 1158447603@qq.com

互异构的过程^[10]。基于上述角度烧孔理论, Segev 等^[11]进一步考虑了两种异构体相互转变的循环过程中分子的旋转, 以及由于热弛豫效应导致的分子旋转扩散效应。Sekkat 等^[12]提出一种平均场理论模型, 研究对象是中等规模的液晶偶氮苯侧链型聚合物的光致异构过程。Soljačić 等^[13]拓展了 Sekka 等提出的模型, 提出针对无定形聚合物的平均场理论。李燕明等^[14]提出在偶氮苯聚合物中形成光学空间孤子。随后, Bian 等^[15]在聚甲基丙烯酸酯掺杂分散红-1 的聚合物中观察到线偏振的光学空间孤子。

以上的理论工作大多没有具体分析偶氮苯聚合物光致异构效应与聚合物折射率变化关系以及孤子的形成条件, 尤其是缺少对二维孤子的研究。本文基于“角度烧孔”模型, 根据聚合物中光致异构动力学方程推导出光致偶氮苯聚合物材料折射率改变的公式, 并进行理论仿真。分析了光致偶氮苯聚合物材料折射率变化规律, 进而分析了光致聚合物异构介质中不同类型孤子的形成机理。

2 基本原理

2.1 背景光作用下光致异构折射率改变

在线偏振光激发下, 偶氮染料光致异构过程满足如下动力学方程^[16]:

$$\frac{dN'}{dt} = -q_{ts}\sigma_t^{\parallel} I_s N' \cos^2\theta + q_{cs}\sigma_c I_s (N_0 - N') - q_{tb}\sigma_t^b I_b N' + q_{cb}\sigma_c^b I_b (N_0 - N') + v_c (N_0 - N'), \quad (1)$$

式中: N_0 、 N' 分别表示没有光照射和线偏振光照射下反式态异构体分子的浓度; θ 为线偏振信号光电场方向与反式态分子轴的夹角; q_{ts} 、 q_{cs} 分别为信号光照射下反式态和顺式态的量子产率; q_{tb} 、 q_{cb} 则对应背景光照射下的量子产率; σ_t^{\parallel} 、 σ_c 为信号光电场方向与反式态分子轴平行时反式态和顺式态对信号光的吸收截面; σ_t^b 、 σ_c^b 分别对应背景光的吸收截面; I_s 为信号光的光强; I_b 则对应背景光的光强; v_c 为热致顺式态转变为反式态异构的速率。

光致异构引起折射率改变的产生机制是由于不同结构和不同取向的偶氮苯分子对材料的线性折射率贡献不同。在适当波长的光波的激发下, 偶氮苯分子的结构发生变化, 分子取向也可能发生改变, 并经过 trans→cis→trans 的循环, 分子产生角向分布, 使得材料的折射率发生改变, 也就是说光致异构所致的折射率改变有双方面的贡献。因此, 将这种折

射率改变效应称为光致异构非线性效应。

在稳态情况下, $dN'/dt=0$, 反态分子浓度为

$$N_1 = \frac{N_0 (q_{cs}\sigma_c I_s + q_{cb}\sigma_c^b I_b + v_c)}{q_{ts}\sigma_t^{\parallel} I_s \cos^2\theta + q_{cs}\sigma_c I_s + q_{tb}\sigma_t^b I_b + q_{cb}\sigma_c^b I_b + v_c} \quad (2)$$

设 $\alpha = \frac{q_{cs}\sigma_c}{q_{tb}\sigma_t^b}$, $\beta = \frac{q_{ts}\sigma_t^{\parallel}}{q_{tb}\sigma_t^b}$, $\gamma = \frac{q_{cb}\sigma_c^b I_b + v_c}{q_{tb}\sigma_t^b I_b}$, $I = \frac{I_s}{I_b}$, 代入(1)式和(2)式可得

$$\begin{cases} N_1 = N_0 \frac{\alpha I + \gamma}{\beta I \cos^2\theta + \alpha I + \gamma + 1}, \\ N_1' = N_0 \frac{\gamma}{\gamma + 1} \end{cases}, \quad (3)$$

信号光引起的折射率改变量为

$$\Delta(n^2) = S \int (N_1 - N_1') \cos^2\theta d\Omega, \quad (4)$$

式中: Ω 为立体角, $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$; S 为与信号光波长、样品材料有关的参数。令 $P = (\alpha I + \gamma + 1)/\beta I$, $Q = (\alpha I + \gamma)/\beta I$, 将(1)~(3)式代入(4)式可得线偏振信号光引起的折射率改变量:

$$\Delta(n_1^2) = 4\pi S N_0 \left[Q (1 - \sqrt{P} \arctan \sqrt{P}) - \frac{\gamma}{3(1 + \gamma)} \right], \quad (5)$$

圆偏光的折射率改变的解析公式^[16]为

$$\Delta(n_c^2) = 4\pi S N_0 \left\{ Q \left[1 + \frac{P}{\sqrt{2P+1}} \ln \frac{2P}{(\sqrt{2P+1} + 1)^2} \right] - \frac{\gamma}{3(1 + \gamma)} \right\}. \quad (6)$$

2.2 光致异构空间孤子

在傍轴近似和慢变振幅近似下, 描述二维光束传播的非线性薛定谔方程为^[17]

$$i \frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{1}{2k} \left(\frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \right) A + \frac{k_0^2 \Delta(n^2)}{2k} A = 0, \quad (6)$$

式中: A 为信号光的光电场振幅; $k = n_0 k_0$, k_0 为信号光的真空波数, n_0 为本底折射率; n 为折射率; 且 $\Delta(n^2) \approx 2n_0 \Delta n$; Z 为光束的传播方向。

利用坐标变换 $X = x (2\pi k_0^2 n_0 \alpha N)^{-1/2}$, $Y = y (2\pi k_0^2 n_0 \alpha N)^{-1/2}$, $Z = z (2\pi k_0 \alpha N)^{-1}$, 把(6)式变换为如下无量纲形式:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) A + f(|A|^2) A = 0, \quad (7)$$

式中： $f(|A|^2) = f(I) = b/d - (aI + b)/(cI + d)$ ，其中 a, b, c, d 为均匀背景光参数。由于二维非线性

性方程的解析过程非常复杂和繁琐，采用快速傅里叶算法^[7]进行数值仿真，仿真结果如图 1~3 所示。

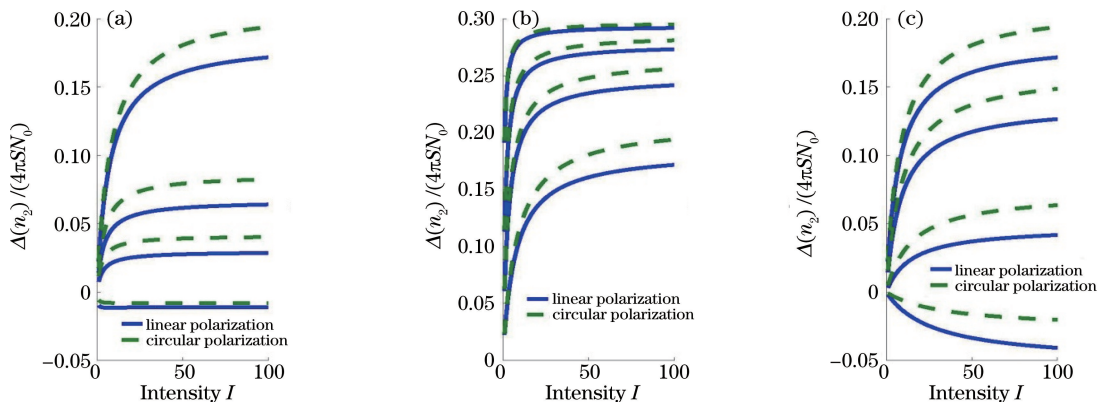


图 1 α, β, γ 取不同值时 $\Delta(n^2)/(4\pi SN_0)$ 随光强 I 变化关系图。(a) $\beta = \gamma = 0.1$, 从上到下 $\alpha = 0.1, 0.3, 0.7, 2.0$;
(b) $\alpha = \gamma = 0.2$, 从上到下 $\beta = 0.1, 0.4, 1, 4$; (c) 从上到下 $\alpha = \beta = 0.1, \gamma = 0.1, 0.3, 2.0, 6.0$

Fig. 1 Refractive index $\Delta(n^2)/(4\pi SN_0)$ varies with the light intensity I with different α, β, γ .

(a) $\beta = \gamma = 0.1$, and $\alpha = 0.1, 0.3, 0.7, 2.0$; (b) $\alpha = \gamma = 0.2$, and $\beta = 0.1, 0.4, 1, 4$; (c) $\alpha = \beta = 0.1$, and $\gamma = 0.1, 0.3, 2.0, 6.0$

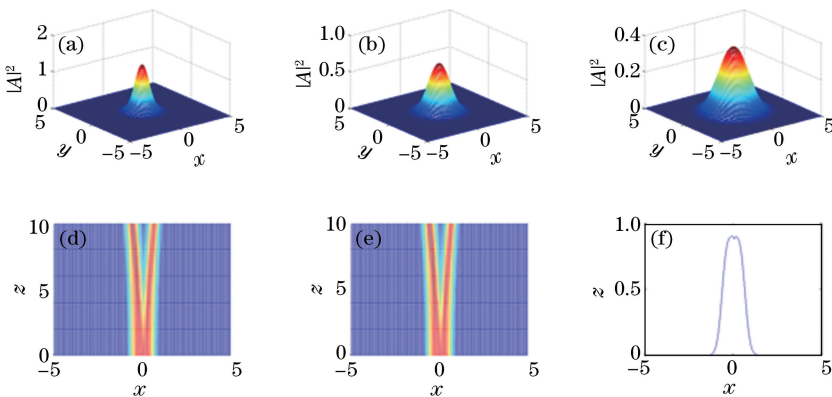


图 2 (a)~(c)亮孤子在 $z=0, 5, 9$ 时的三维图;(d)、(e)亮孤子沿 z 方向传输的二维图;
(f) $z=8$ 时截取的二维图, $a=d=1, b=0.25, c=8$

Fig. 2 Intensity distributions of bright soliton at $z=(a) 0, (b) 5$, and $(c) 9$; (d) intensity contour plot in the $x-z$ plane; (e) intensity contour plot in the $x-y$ plane; (f) corresponding intensity contour at $z=8$, other parameters are $a=d=1, b=0.25, c=8$

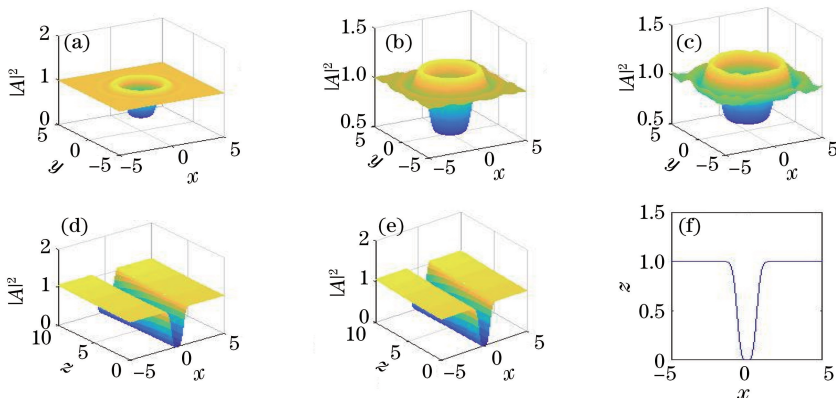


图 3 (a)~(c)暗孤子在 $z=0, 5, 9$ 时的三维图;(d)、(e)孤子沿 z 方向传输的三维图;
(f) 当 $z=9$ 时截取的二维图, 参数 $a=d=1, b=0.25, c=2$

Fig. 3 Intensity distributions of dark soliton at $z=(a) 0, (b) 5$, and $(c) 9$; (d), (e) intensity transmission property of soliton along z -axis; (f) corresponding intensity contour at $z=9$, other parameters are $a=d=1, b=0.25, c=2$

4 分析与讨论

从图 1(a)可看出: β 较小时,圆偏振光引起的折射率改变效应比线偏振光的强, $\beta=2$ 时,结果相反;随着光强的增加,折射率的改变趋于饱和;折射率的改变随着 β 的增加而减小,并且由正变负。从图 1(b)可看出:圆偏振光引起的折射率改变效应始终比线偏振光的强;随着光强的增加,折射率的改变单调递增,并趋于饱和;折射率的改变随着 β 的增加而增大,并且一直大于 0。从图 1(c)可看出:当 γ 较小时,圆偏振光引起的折射率的改变效应比线偏振光的强;随着光强的增加,折射率的改变将趋于饱和;折射率的改变随 γ 的增加而减小,并且由正变负。

在背景光的作用下,若线偏振信号光和圆偏振信号光引起的折射率改变均为正,说明光致异构非线性是自聚焦型的, Δn 随 I 的增大而单调递减,而且是可饱和的,因而可能形成二维的亮孤子。亮孤子的传输特性如图 2 所示,随着传输距离的增加,孤子的宽度有所增加,强度逐渐加强。相反,在背景光的作用下,若线偏振信号光和圆偏振信号光引起的折射率改变为负,光致异构非线性是自散焦型的,能形成二维的暗孤子。暗孤子传输特性如图 3 所示。

以上分析表明,虽然光致异构亮、暗孤子不可能自发形成,但是加入一束均匀的背景光以后非自发的亮、暗孤子即可获得。

5 结论

综上所述,在有背景光的条件下,光致异构非线性效应是一种饱和非线性效应,折射率的改变可正可负,在材料中既可以形成亮孤子,也可以形成暗孤子;背景光可以控制亮、暗孤子传播。该结果为实际的光控方案提供了一种思路。

参 考 文 献

- [1] Huang J N, Xu J Z, Xiong Y T. Soliton: concept, principle and application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 121-126.
黄景宁, 徐济仲, 熊吟涛. 孤子: 概念、原理和应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 121-126.
- [2] Liu J N, Xu S L. Study on spatial optical soliton transmission characteristics in non-localized nonlinear media[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040602.
刘建南, 徐四六. 非定域非线性介质中空间光孤子传

输特性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040602.

- [3] Xu S L, Zhou G P, Petrović N, *et al.* Nonautonomous vector matter waves in two-component Bose-Einstein condensates with combined time-dependent harmonic-lattice potential[J]. Journal of Optics, 2015, 17(10): 105605.
- [4] Xu S L, Cheng J X, Belić M R, *et al.* Dynamics of nonlinear waves in two-dimensional cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation with spatially modulated nonlinearities and potentials [J]. Optics Express, 2016, 24(9): 10066-10077.
- [5] Xu S L, Petrović N, Belić M R, *et al.* Light bullet supported by parity-time symmetric potential with power-law nonlinearity [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84(4): 1877-1882.
- [6] Zhou B Z, Hua C B, Xu S L, *et al.* Optical vortex soliton in parity-time symmetric potentials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 42(5): 0505004.
周博臻, 花春波, 徐四六, 等. PT 对称晶格势中涡旋光孤子[J]. 中国激光, 2016, 42(5): 0505004.
- [7] Xu S L, Zhao G P, Belić M R, *et al.* Light bullets in coupled nonlinear Schrödinger equations with variable coefficients and a trapping potential [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 9094-9104.
- [8] Zhang C H, Xu S L. Multi-polar optical soliton in two dimensional PT-symmetric lattice [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0219001.
章臣浩, 徐四六. 二维 PT 对称晶格势中的多极光孤子[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0219001.
- [9] Li Y G, She W L. Perpendicular all-optical control of optical spatial soliton in photoisomeric polymers[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(2): 895-901.
黎扬钢, 余卫龙. 光致异构聚合物中光学空间孤子的垂直全光调控[J]. 物理学报, 2007, 56(2): 895-901.
- [10] Schönhoff M, Mertesdorf M, Lösche M. Mechanism of photoreorientation of azobenzene dyes in molecular films[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1996, 100(18): 7558-7565.
- [11] Segev M, Valley G C, Singh S R, *et al.* Vector photorefractive spatial solitons [J]. Optics Letters, 1995, 20(17): 1764-1766.
- [12] Sekkat Z, Dumont M. Polarization effects in photoisomerization of azo dyes in polymeric films[J]. Applied Physics B, 1991, 53(2): 121-124.
- [13] Soljačić M, Sears S, Segev M. Self-trapping of "necklace" beams in self-focusing Kerr media [J].

- Physical Review Letters, 1998, 81(22): 4851-4854.
- [14] Li Y M, Chen L X, She W L. Theoretical and experimental research on photonics of all optical logic gates based on photoisomerization[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5895-5902.
李燕明, 陈理想, 余卫龙. 光致异构全光逻辑门理论与实验研究[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5895-5902.
- [15] Bian S, Kuzyk M G, Dark spatial solitons in bulk azo-dye-doped polymer using photo induced molecular reorientation[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(7): 1104-1106.
- [16] Loucif-Saibi R, Nakatani K, Delaire J A, *et al.* Photoisomerization and second harmonic generation in disperse red one-doped and functionalized poly (methyl methacrylate) films [J]. Chemistry of Materials, 1993, 5: 229-236.
- [17] Huang Y P, Wang H, Wen J H, *et al.* The ultrafast photo-induced birefringence of a new kind azobenzene side-chain polymer[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(4): 501-504.
黄亚萍, 王惠, 文锦辉, 等. 新型偶氮苯侧链共聚物的超快光致双折射特性[J]. 光学学报, 2003, 23(4): 501-504.