

文章编号: 0258-7025(2008)05-0694-04

温度对双光子光折变介质中 光伏孤子特性的影响

张 宇 侯春风* 孙秀冬

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 具有双光子光折变效应的光折变介质温度的变化对光伏孤子性质具有影响。通过光伏空间孤子的演化方程得到的亮和暗光伏空间孤子解与温度相关,在室温范围内,双光子光折变介质中空间孤子的光强和强度半峰全宽(FWHM)均受温度影响。随着介质温度的升高,双光子光折变介质支持光强较小的光伏空间孤子;在较大光强情况下,双光子光折变介质支持强度半峰全宽较小的光伏空间孤子;在小光强情况下,双光子光折变介质支持强度半峰全宽较大的光伏空间孤子。即可以通过控制光折变介质的温度来控制介质中光伏孤子的空间形态,从而在光折变介质中形成稳定的光伏空间孤子。

关键词 非线性光学;光折变介质;双光子光折变效应;空间孤子温度特性

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Temperature Effects on the Photovoltaic Spatial Solitons in Two-Photon Photorefractive Media

Zhang Yu Hou Chunfeng Sun Xiudong

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The characteristic of the photovoltaic spatial solitons in two-photon photorefractive media is influenced by the temperature of the media. The bright and dark spatial soliton solutions of the evolution equation of spatial solitons are related to the temperature. The intensity profile and the full-width at half maximum (FWHM) of photovoltaic spatial solitons in two-photon photorefractive media are dependent on the temperature of the media in the room temperature range. With the raising of the temperature of the two-photon photorefractive media, the photovoltaic spatial solitons with small intensity can be supported, moreover, the photovoltaic spatial solitons with small FWHM can be established under the large intensity case, and the photovoltaic spatial solitons with wider FWHM can be formed under the small intensity case. That is to say that the profiles of the photovoltaic spatial solitons can be controlled by the temperature, so as to form the steady photovoltaic spatial solitons in the two-photon photorefractive media.

Key words nonlinear optics; photorefractive media; two-photon photorefractive effect; temperature effects of the spatial soliton

1 引 言

光折变空间孤子源于介质的光折变效应,由于介质的暗辐射在光折变过程中起着一定的作用,因此介质的暗辐射对光折变孤子的形成有一定的影响。而介质的暗辐射强度又与温度密切相关^[1],所

以介质温度的变化会影响到介质内光折变孤子的特性。刘劲松等^[2~5]研究了单光子光折变介质内亮孤子的温度特性。王红成等^[6]讨论了孤子峰值光强与暗辐射强度之比对介质中孤子稳定性的影响。朱楠等^[7]研究了调制扰动对介质中孤子稳定性的影响。

收稿日期:2007-08-25;收到修改稿日期:2007-10-07

基金项目:国家自然科学基金(60508005)资助项目。

作者简介:张宇(1965—),男,黑龙江人,博士,副教授,主要从事光折变非线性光学和光电信号检测等方面的理论研究。

E-mail: zhangyunn@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: houchunfeng@hit.edu.cn

本文基于具有双光子光折变效应的介质,从理论上研究了光折变介质中光伏孤子由于介质暗辐射受温度的影响而引起的温度特性以及温度对孤子稳定性的影响。

2 光伏空间孤子的演化方程

在具有双光子光折变效应的光伏介质中,一束光线沿 z 轴传播,仅在 x 方向上发生衍射,将启动光照射下的具有双光子光折变效应的介质的光轴沿 x 方向放置,并假定入射光的偏振方向平行于介质的光轴。

以慢变包络函数 $\phi(x, z)$ 表示入射光的光场,即

$$\mathbf{E} = \hat{x}\phi(x, z)\exp(ikz), \quad (1)$$

由文献[8, 9]可知入射光光场的慢变包络函数 $\phi(x, z)$ 满足

$$i\phi_z + \frac{1}{2k}\phi_{xx} - \frac{k_0 n_e^3 r_{33} E_{sc}}{2}\phi = 0, \quad (2)$$

可以从描述双光子光折变效应的 Castro-Camus 模型中的速率方程、电流方程和泊松方程得到空间电荷场强 E_{sc} 的明显表达式。对于稳态情况,在光伏介质内,由于光伏电场占主导地位,可以忽略扩散效应的影响。则 E_{sc} [10] 为

$$E_{sc} = -E_p \frac{s_2 I_2 (I_2 + I_{2d} + \gamma_1 N_A / s_2)}{(s_1 I_1 + \beta_1)(I_2 + I_{2d})}, \quad (3)$$

这里, $E_p = \frac{\kappa \gamma N_A}{e\mu}$ 表示由于光伏效应产生的光伏电场的场强, $I_{2d} = I_{2d}(T)$ 表示暗辐射强度,是一个与温度相关的量[1], 满足

$$I_{2d} = I_{2d}(T) = I_{2d0} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \exp\left[\frac{E_t}{k_B} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (4)$$

式中 I_{2d0} 为温度 300 K 时的暗辐射强度, $E_t = 10^{-19}$ J 为介质能带间隙, k_B 为玻耳兹曼常数。

将(3)式代入(2)式中,采用无量纲坐标及变量: $s = x/x_0$, $\xi = z/(kx_0^2)$, $\phi = (2\eta_0 I_{2d}/n_e)^{1/2} U$, 由此建立的光伏孤子演化方程为

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} + \alpha\sigma U + \alpha\tau |U|^2 U - \frac{\alpha\sigma U}{|U|^2 + 1} = 0, \quad (5)$$

这里 $\alpha = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33} / 2) E_p$, $\sigma = \gamma_1 N_A / s_2 I_{2d}(T) = \gamma_1 N_A / \beta_2(T)$, 即

$$\sigma(T) = \frac{\gamma_1 N_A}{s_2 I_{2d}(T)} = \sigma_0 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2} \exp\left[-\frac{E_t}{k_B} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (6)$$

式中 $\sigma_0 = \gamma_1 N_A / s_2 I_{2d0} = \gamma_1 N_A / \beta_{20}$ 。

$\tau = \beta_2 / (s_1 I_1 + \beta_1)$, 即

$$\tau = \frac{\beta_2}{s_1 I_1 + \beta_1} = \frac{s_2 I_{2d}(T)}{s_1 I_1 + \beta_1} = \tau_0 \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \exp\left[\frac{E_t}{k_B} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (7)$$

式中 $\tau_0 = s_2 I_{2d0} / (s_1 I_1 + \beta_1)$ 。

(5)式具有与温度相关的亮、暗光伏空间孤子解,本文在室温变化范围内研究了光伏空间孤子的温度特性,温度变化范围为 279~313 K。

3 亮光伏空间孤子的温度特性

对于亮光伏空间孤子,设 $U = r^{1/2} y(s) \exp(i\nu \xi)$, 这里 ν 表示光束传播常数的非线性偏移, $y(s)$ 为归一化的实函数, r 表示亮光伏空间孤子光束的峰值光强与暗辐射强度 I_{2d} 的比值,即

$$r = r(T) = \frac{I(0)}{I_{2d}(T)} = r_0 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2} \exp\left[-\frac{E_t}{k_B} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (8)$$

式中 $r_0 = I(0) / I_{2d0}(T)$ 。

如果双光子光折变光伏晶体的折射率变化值为正,即 $\alpha > 0$ ($E_p > 0$), 此时光伏电场的方向与介质光轴方向相同,则可以在光伏光折变晶体中形成亮光伏空间孤子。由(5)式得到的亮光伏空间孤子解为

$$s = \pm \int_y^1 (\alpha\tau)^{-1/2} \left\{ \frac{2\sigma}{r} [\ln(1 + r\tilde{y}^2) - \tilde{y}^2 \ln(1 + r)] + r\tilde{y}^2 (1 - \tilde{y}^2) \right\} d\tilde{y}, \quad (9)$$

式中 σ, τ 和 r 均与温度相关,故(9)式是与温度相关的。

由于(9)式的积分困难,可以通过数值计算研究亮光伏空间孤子解的强度轮廓与温度的关系。以 Cu:KNSBN 晶体[11,12] 为例来讨论温度对亮光伏孤子稳定性的影响。相关参数为: $n_e = 2.27$, $r_{33} = 200 \times 10^{-12}$ mV⁻¹, $E_p = 2.8 \times 10^6$ V/m。其他参数为 $\lambda_0 = 0.5$ μm , $x_0 = 10$ μm 。可以计算出 $\alpha = 117.3$ 。取 $\sigma_0 = 10^4$, $\tau_0 = 1.5 \times 10^{-4}$, $r_0 = 10$ 时,在室温变化范围内,分别取 $T = 285$ K, 291 K, 300 K, 306 K。图 1 为双光子光折变介质中亮光伏空间孤子光强的稳定性与温度的关系。结果表明,在室温变化范围内,随着温度的增加,介质支持的亮光伏空间孤子的光强和半峰全宽(FWHM)均减小,这与亮屏蔽空间孤子的情形相似。

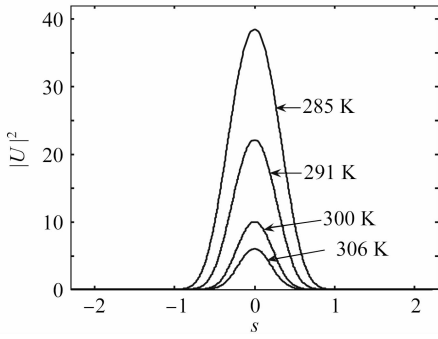


图 1 不同温度下亮光伏空间孤子的强度轮廓

Fig. 1 Intensity profiles of bright photovoltaic spatial solitons under different temperatures

4 暗光伏空间孤子的温度特性

在具有双光子光折变效应的光伏介质中,为了得到暗光伏空间孤子解,设 $U = \rho^{1/2} y(s) \exp(iu\xi)$, 这里 $y(s)$ 为归一化奇函数, $\rho = I_{2\infty}/I_{2d}$ 为暗光伏空间孤子无限远处光强的最大值与暗辐射强度之比为

$$\rho = \rho(T) = \frac{I_{\infty}}{I_{2d}(T)} = \rho_0 \left(\frac{T}{300} \right)^{-3/2} \exp \left[-\frac{E_t}{k_B} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (10)$$

式中 $\rho_0 = I_{\infty}/I_{2d0}$ 。

对于(5)式,若满足 $\alpha < 0$ (即 $E_p < 0$) 的条件,即双光子光折变光伏晶体的折射率变化值为负的,此时光伏电场的方向与介质光轴方向相反,则可以在光伏光折变晶体中形成暗光伏空间孤子,其光强的轮廓分布为

$$s = \pm \int_y^0 (-\alpha\tau)^{-1/2} \left[\frac{2\sigma}{\rho+1} (\tilde{y}^2 - 1) - \frac{2\sigma}{\rho} \ln \left(\frac{1+\rho\tilde{y}^2}{1+\rho} \right) + \rho(\tilde{y}^2 - 1)^2 \right]^{-1/2} d\tilde{y}, \quad (11)$$

式中 σ, τ 和 ρ 均与温度相关,故暗光伏空间孤子解是与温度相关的。

由(11)式无法得到暗光伏空间孤子的解析解,可以通过数值计算研究暗光伏空间孤子解的强度轮廓与温度的关系。以具有双光子光折变效应的 LiNbO_3 晶体为例,相应的参数^[8,13]为: $n_e = 2.2, r_{33} = 30 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}, E_p = 4 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。其他参数为 $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}, x_0 = 10 \mu\text{m}, I_1 = 1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 。可以计算得到 $\alpha = 22.2, \tau_0 = 1.67 \times 10^{-4}$, 取 $\sigma_0 = 10^4, \rho_0 = 10$ 时,图 2 通过数值计算给出了双光子光折变介质中暗光伏空间孤子强度轮廓受温度影响后的分布。结果表明,在室温变

化范围内,随着温度的升高,介质支持的暗光伏空间孤子的最大光强和半峰全宽均减小。

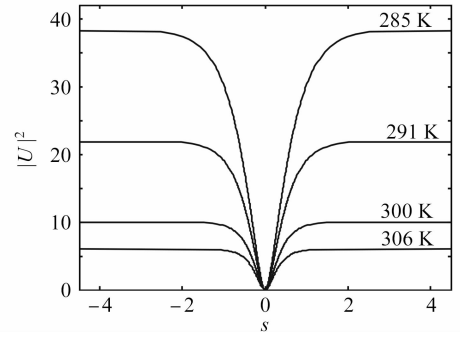


图 2 不同温度下暗光伏空间孤子的强度轮廓

Fig. 2 Intensity profiles of dark photovoltaic spatial solitons under different temperatures

5 小光强情况下光伏孤子的温度特性

当入射光较弱时,其光强较小,即 $|U|^2 \ll 1$,利用泰勒展开可以将(5)式化简为

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} + \alpha\tau(1+\sigma)|U|^2U = 0, \quad (12)$$

(12)式为非线性薛定谔(Schrödinger)方程的修正形式,对于亮光伏空间孤子和暗光伏空间孤子,均可求得其精确的解析解。

5.1 亮光伏孤子的温度特性

当 $\alpha > 0$ 时,(12)式的亮光伏孤子解析解为

$$U(s, \xi) = r^{1/2} \text{sech} \{ [\alpha\tau r(1+\sigma)]^{1/2} s \} \times \exp[i\alpha\tau r(1+\sigma)\xi/2], \quad (13)$$

式中 σ, τ 和 r 均与温度相关,可见(13)式所表达的亮光伏孤子解随温度而变化。

仍以 Cu:KNSBN 晶体^[11,12] 为例来说明温度对亮光伏孤子稳定性的影响。取 $\sigma_0 = 10^4, \tau_0 = 1.5 \times 10^{-4}, r_0 = 0.1$ 时,在室温变化范围内,分别取 $T = 285 \text{ K}, 291 \text{ K}, 300 \text{ K}, 306 \text{ K}$ 。图 3 给出了双光

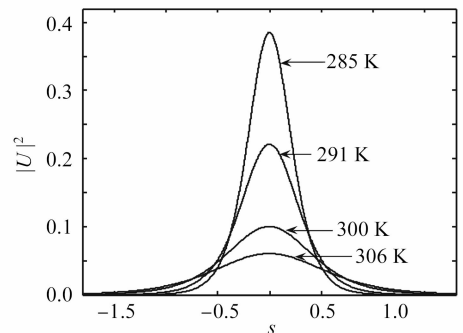


图 3 不同温度下小光强亮光伏空间孤子的强度轮廓

Fig. 3 Intensity profiles of bright photovoltaic spatial solitons at low intensity under different temperatures

子光折变介质中亮光伏空间孤子光强的稳定性与温度的关系。可见,在室温变化范围内,随着温度的增加,介质支持的小光强亮光伏空间孤子的强度减小,同时介质支持的亮光伏空间孤子的半峰全宽增加。在室温情况下,要保持孤子的稳定性就需要使双光子光折变晶体处于某一合适的温度范围。

5.2 暗光伏孤子的温度特性

当 $\alpha < 0$ 时,(12) 式的暗光伏孤子解析解为

$$U(s, \xi) = \rho^{1/2} \tanh\{-\alpha\tau\rho(1+\sigma)^{1/2}s\} \times \exp[i\alpha\tau\rho(1+\sigma)\xi], \quad (14)$$

式中 σ, τ 和 ρ 均与温度相关,故(14)式暗光伏孤子解亦随温度变化。

以具有双子光折变效应的 LiNbO_3 晶体为例^[8, 13], $\alpha = 22.2$, $\tau_0 = 1.67 \times 10^{-4}$, 取 $\sigma_0 = 10^4$, $\rho_0 = 0.1$ 时,图 4 给出了双光子光折变介质中暗光伏空间孤子光强受温度影响的分布。表明在小光强情况下,在室温变化范围内,随着介质温度的变化,介质支持的暗光伏空间孤子的最大光强在减小,同时介质支持的暗光伏空间孤子的宽度急剧增加,如果温度进一步增加,将最终导致孤子的瓦解。

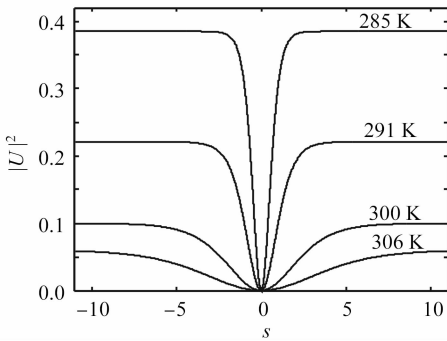


图 4 不同温度下小光强暗光伏空间孤子的强度轮廓

Fig. 4 Intensity profiles of dark photovoltaic spatial solitons at low intensity under different temperatures

6 结论

研究了温度变化对双光子光折变介质中光伏孤子稳定性的影响。结果表明,在室温范围内,随着双光子光折变介质温度的升高,双光子光折变介质支持光强较小的光伏空间孤子;在较大光强情况下,双光子光折变介质支持半峰全宽较小的亮光伏空间孤子和暗光伏空间孤子;在小光强情况下,双光子光折变介质支持半峰全宽较大的光伏空间孤子。

当双光子光折变介质的温度发生变化时,双光子光折变介质支持的空间孤子形态的变化本质上是由于光折变介质自身的暗辐射强度随着温度发生变

化,从而对入射的孤子光束产生了影响,使得在某一温度下形成的稳定孤子,当温度在一个较小的范围内变化时,孤子能够克服较小的微扰而保持其稳定性;而当介质温度发生比较大的变化而超出了孤子稳定温度范围时,孤子则变得不稳定;反之,也可以通过改变介质的温度而使不稳定的孤子变成稳定孤子。即可以通过控制光折变介质的温度来控制介质中孤子的空间形态。

参 考 文 献

- Li-Jen Chen, Afshin Partovi. Temperature and intensity dependence of photorefractive effect in GaAs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(21):1456~1458
- Zhang Guangyong, Liu Jinsong. Temperature effects on the self-deflection of screening spatial bright solitons [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2006, **34**(12):121~124
张光勇,刘劲松. 温度对屏蔽明空间孤子自偏转特性的影响 [J]. *华中科技大学学报*, 2006, **34**(12):121~124
- Ji Xuanmang, Wang Jinlai, Liu Jinsong. Temperature dependence of the low-amplitude photovoltaic bright spatial solitons in photorefractive crystal [J]. *Journal of Shanxi University*, 2005, **28**(3):273~275
吉选芒,王金来,刘劲松. 光折变晶体中低振幅光伏明孤子的温度特性 [J]. *山西大学学报*, 2005, **28**(3):273~275
- Jinsong Liu, Zhonghua Hao. Temperature effects on the self-deflection of screening-photovoltaic spatial bright solitons in biased photovoltaic-photorefractive crystals [J]. *Phys. Lett. A*, 2001, **285**(9):377~382
- Ji Xuanmang, Wang Jinlai, Liu Jinsong *et al.*. The temperature dependence of incoherently coupled bright-dark screening-photovoltaic soliton pairs [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(4):387~389
吉选芒,王金来,刘劲松等. 非相干耦合亮-暗屏蔽光伏孤子对的温度特性 [J]. *激光技术*, 2004, **28**(4):387~389
- Wang Hongcheng, Jiang Desheng, Wang Xiaosheng *et al.*. Study on one-dimensional gray photovoltaic spatial solitons and their stability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1111~1116
王红成,江德生,王晓生等. 一维光伏空间灰孤子及其稳定性研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1111~1116
- Zhu Nan, Guo Ru, Liu Simin *et al.*. Photovoltaic gray spational solitons in photorefractive crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):903~907
朱楠,郭儒,刘思敏等. 光折变晶体中的光生伏打灰空间孤子 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):903~907
- D. N. Christodoulides, M. I. Carvalho. Bright, dark, and grey spatial soliton states in photorefractive media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(9):1628~1633
- Jinsong Liu, Keqing Lu. Screening-photovoltaic spatial solitons in biased photovoltaic- photorefractive crystals and their self-deflection [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(4):550~555
- Chunfeng Hou, Yanbo Pei, Zhongxiang Zhou *et al.*. Spatial solitons in two-photon photorefractive media [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(5):053817
- Liu Simin, Guo Ru, Xu Jingjun. *Photorefractive Nonlinear Optics and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2004. 136~152
刘思敏,郭儒,许京军. *光折变非线性光学及其应用* [M]. 北京:科学出版社, 2004. 136~152
- W. L. She, K. K. Lee, W. K. Lee. Observation of two-dimensional bright photovoltaic spatial solitons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(16):3182~3185
- Bo Liu, Liren Liu, Liangying Xu. Characteristics of recording and thermal fixing in lithium niobate [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(11):2170~2176