

文章编号: 0253-2239(2010)03-0866-06

双光子光折变介质中屏蔽空间孤子的温度特性

张 宇 侯春风 王 飞 孙秀冬

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 温度对具有双光子光折变效应的介质中屏蔽空间孤子的稳定性具有显著的影响。由屏蔽空间孤子演化方程得到的亮和暗屏蔽空间孤子解是温度相关的, 在室温范围内, 双光子光折变介质中屏蔽空间孤子光强和强度半峰全宽(FWHM)均受温度的影响而发生明显变化。随着温度的升高, 双光子光折变介质中形成光强较小的亮和暗屏蔽空间孤子, 在较大光强情况下, 形成 FWHM 较小的亮屏蔽空间孤子; 在小光强情况下, 随着温度升高, 双光子光折变介质中形成 FWHM 较大的亮和暗空间孤子; 并且亮屏蔽空间孤子在介质中的空间偏移和角偏转都随温度的降低而增加。

关键词 非线性光学; 屏蔽空间孤子; 双光子光折变效应; 温度特性

中图分类号 O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0866

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

Zhang Yu Hou Chunfeng Wang Fei Sun Xiudong

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

Abstract The characteristic of screening spatial solitons in two-photon photorefractive media is influenced by media temperature. The light and dark screening spatial soliton solutions derived from the evolution equation of spatial solitons are temperature-dependent. The intensity profile and the full width at half maximum (FWHM) of screening spatial solitons in two-photon photorefractive media are strongly influenced by the media temperature in the room temperature range. By raising the media temperature, the screening spatial solitons with low intensity are formed, and moreover, the light and dark screening spatial solitons with narrow FWHM are formed under the high light intensity case, and the light and dark screening spatial solitons with wider FWHM are formed under the low light intensity case. The self-deflection of bright screening spatial solitons in crystals strongly depends on the temperature, and the spatial shift of the beam center and the deflection angle all increase with the dropping of the temperature.

Key words nonlinear optics; screening spatial solitons; two-photon photorefractive effect; temperature effects

1 引 言

光折变空间孤子在很低的光功率下就可以形成, 其在光学开关、光学集成、光互联及光计算等方面的巨大潜在应用前景吸引着人们的注意, 成为近年来光折变非线性光学领域中的一个研究热点。已经研究的光折变空间孤子有准稳态孤子^[1]、屏蔽孤子^[2~5]、光伏孤子^[6~9]和屏蔽-光伏孤子等^[10,11]。

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^[12], 所以介质温度的变化对介质内的光折变孤子也具有一定的影响。刘劲松等^[13~18]基于具有单光子光折变效应的介质, 研究了光折变空间孤子的温度特性。

收稿日期: 2009-02-25; 收到修改稿日期: 2009-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(60508005)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

作者简介: 张 宇(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光折变非线性光学、激光探测的弱信号检测等方面的研究。

E-mail: zhangyunn@hit.edu.cn

当温度发生小的变化时,屏蔽光伏孤子由一个稳态演变成另一个稳态;当温度变化较大时,孤子将变得不稳定,甚至瓦解。选择晶体的温度,可以使屏蔽光伏空间孤子处于适当的稳态。并研究了温度对亮屏蔽光伏空间孤子和亮屏蔽空间孤子偏转的影响。本文基于具有双光子光折变效应的介质^[19,20],主要从理论上研究双光子光折变介质中屏蔽空间孤子的稳定性受温度的影响及亮屏蔽空间孤子自偏转特性受温度的影响。

2 温度影响下的双光子光折变介质中屏蔽空间孤子的演化方程

在具有双光子光折变效应的介质中,一束仅在 x 方向上发生衍射的光线沿 z 轴传播,并且光波的偏振方向平行于 x 轴。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,则入射光的偏振方向平行于介质的光轴,并假定外加电场的方向亦平行于介质的光轴。以慢变包络函数 $\phi(x, z)$ 表示入射光的光场,即

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

入射光光场的慢变包络函数 $\phi(x, z)$ 满足下述演化方程^[3]:

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

对于具有双光子光折变效应的介质,可以从 Castro-Camus 模型^[19]中的速率方程、电流方程和泊松方程得到 E_{sc} 的明显表达式。若外电场足够大,以至于可以忽略扩散作用的影响时,空间电荷场场强^[20]为

$$E_{sc} = E_0 \frac{(I_{2\infty} + I_{2d})(I_2 + I_{2d} + \frac{\gamma_1 N_A}{s_2})}{(I_2 + I_{2d})(I_{2\infty} + I_{2d} + \frac{\gamma_1 N_A}{s_2})}, \quad (3)$$

式中 E_0 为外加电场场强, N_A 表示受主(或陷阱)密度, $I_2 = (n_e/2\eta_0)|\phi|^2$ 为晶体中孤子光束的总光强, $I_{2\infty} = I_2(x \rightarrow \pm\infty, z)$, I_{2d} 是暗辐射强度,与温度相关^[12],即

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

式中 T 为绝对温度, I_{2d0} 为室温($T_0 = 300$ K)情况下 I_{2d} 的值, E_t 为间隙中的能级位置,一般取 10^{-19} J, k_B 为波尔兹曼常数。

将(3)式代入(2)式,并采用无量纲变换: $s =$

$x/x_0, \xi = z/(kx_0^2), \phi = (2\eta_0 I_d/n_e)^{1/2} U$, 可以得到屏蔽空间孤子归一化包络函数的演化方程^[20]:

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

式中 $U_\xi = \partial U/\partial \xi, U_{ss} = \partial^2 U/\partial s^2, \rho = \rho(T) = \frac{I_{2\infty}}{I_{2d}(T)}, \beta = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33}/2) E_0, \sigma(T) = \gamma_1 N_A/s_2 I_{2d}(T) = \gamma_1 N_A/\beta_2(T)$, 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 $\sigma_0 = \gamma_1 N_A/s_2 I_{2d0} = \gamma_1 N_A/\beta_{20}$ 。

对于亮空间孤子,其光束中心处光强的最大值与暗辐射强度之比 $r = r(T) = I(0)/I_{2d}(T)$, 即

$$r = r(T) = r_0 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2} \exp\left[-\frac{E_t}{k_B} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (7)$$

式中 $r_0 = I(0)/I_{2d0}$ 。

$\rho = \rho(T) = I_\infty/I_{2d}(T)$ 为无限远处光强的最大值与暗辐射强度之比, 即

$$\rho = \rho(T) = \rho_0 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2} \exp\left[-\frac{E_t}{k_B} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (8)$$

式中 $\rho_0 = I_\infty/I_{2d0}$ 。

在室温变化范围(即 279 K~313 K)内,研究具有双光子光折变介质中屏蔽空间孤子的温度特性。

3 屏蔽空间孤子的温度特性

3.1 亮屏蔽空间孤子的温度特性

对于亮屏蔽空间孤子, $\rho = I_\infty = 0$, 此时将归一化包络函数表示为 $U = r^{1/2} y(s)\exp(i\nu\xi)$, 其中 r 为亮孤子的峰值光强与暗辐射强度之比, 由(7)式表述, 而 $y(s)$ 为归一化的实函数。当 $\beta > 0$ (即 $E_0 > 0$) 时, 在双光子光折变晶体中存在亮屏蔽空间孤子解为^[20]

$$s = \pm \int_y \frac{[2\beta\sigma/(1+\sigma)]^{-1/2} r^{1/2} dy}{[\ln(r\bar{y}^2+1) - \bar{y}^2 \ln(r+1)]^{1/2}}, \quad (9)$$

式中 σ 和 r 均与温度相关, \bar{y} 为与光场慢变包络函数幅值成正比的归一化实函数, 分别由(6)式和(7)式表述, 故亮屏蔽空间孤子解是温度相关的。

由于(9)式积分困难, 可以通过数值计算研究亮屏蔽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 为例^[20,21], 利用数值计算研究

在温度变化情况下,亮屏蔽空间孤子解的轮廓光强和亮屏蔽孤子的强度半峰全宽(FWHM)的稳定性受到的影响,其参数如下: $n_e = 2.2$, $r_{33} = 30 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$, $s_1 = s_2 = 1.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $\beta_{10} = \beta_{20} = 0.05 \text{ s}^{-1}$, $N_A = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $\gamma_1 = 3.3 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 并取 $\lambda_0 = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$, $x_0 = 40 \text{ }\mu\text{m}$, $r_0 = 10$, $E_0 = 2 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ (即 $\beta = 178$). 由上述参数可以计算出 $\sigma_0 = 6.6 \times 10^6$. 在室温情况下,分别取 $T = 285, 291, 300$ 和 306 K . 如图 1 所示,给出了不同温度下亮屏蔽空间孤子强度 $|U|^2$ 关于 s 的关系曲线. 结果表明,在室温变化范围内,随着温度上升,介质中形成强度和 FWHM 较小的亮屏蔽空间孤子. 而具有单光子光折变效应的介质中,孤子的 FWHM 几乎不变^[14].

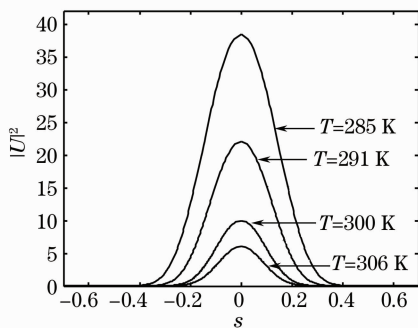


图 1 在不同温度下,亮屏蔽空间孤子强度的轮廓
Fig. 1 Intensity profiles of bright screening spatial solitons under different temperatures

3.2 暗屏蔽空间孤子的温度特性

暗空间孤子 $I(0) = 0$, 而在 $s \rightarrow \pm\infty$ 处,光强最强并趋于一个恒定值,此时 ρ 及 I_∞ 均为有限量. 为得到暗屏蔽空间孤子解,取 $U = \rho^{1/2} y(s) \exp(iu\xi)$, 这里 u 为光束传播常数的非线性偏移, ρ 代表暗孤子的峰值光强 $I_{2\infty}$ 与暗辐射强度 I_{2d} 之比,由(8)式表述, $y(s)$ 为归一化奇函数. 当 $\beta < 0$ (即 $E_0 < 0$) 时,在双光子光折变晶体中存在暗屏蔽空间孤子解为^[20]

$$s = \pm \int_y^0 \frac{[-2\beta\sigma/(\rho+1+\sigma)]^{-1/2} dy}{\{(y^2-1) - [(\rho+1)/\rho] \ln[(1+\rho y^2)/(1+\rho)]\}^{1/2}}, \quad (10)$$

式中 σ 和 ρ 均与温度相关,分别由(6)式和(8)式表述,故暗屏蔽空间孤子解是温度相关的.

由于(10)式难以得到解析解,故通过数值计算得到归一化暗空间孤子解的轮廓. 仍以具有双光子光折变效应的 LiNbO_3 为例^[20,22], 研究在室温变化范围内,暗屏蔽空间孤子光强的稳定性受到的影响. 相关

参数取 $\beta_{10} = \beta_{20} = 0.05 \text{ s}^{-1}$, $E_0 = -2 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ (即 $\beta = -178$), $\sigma_0 = \gamma_1 N_A / \beta_{20} = 6.6 \times 10^6$, $\rho_0 = 10$. 在室温情况下,分别取 $T = 285, 291, 300$ 和 306 K , 如图 2 所示,给出了不同温度下暗屏蔽空间孤子强度关于 s 的关系曲线. 结果表明,在室温变化范围内,介质支持的暗屏蔽空间孤子的最大光强随温度增加而减小,但暗屏蔽孤子的 FWHM 随温度的变化并不明显.

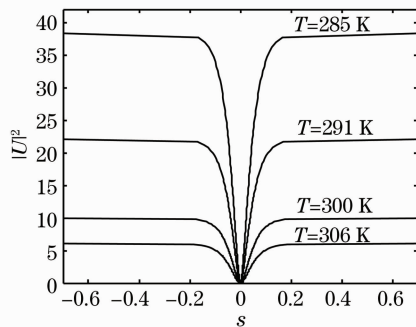


图 2 在不同温度下,暗屏蔽空间孤子的强度轮廓
Fig. 2 Intensity profiles of dark screening spatial solitons under different temperatures

3.3 小光强情况下屏蔽孤子的温度特性

3.3.1 小光强亮屏蔽孤子的温度特性

对于亮屏蔽孤子, $I_\infty = \rho = 0$, 在小光强情况下, $|U|^2 \ll 1$, (5)式可以化为非线性 Schrödinger 方程的修正形式:

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \frac{\beta}{1+\sigma}[(1+\sigma) - \sigma|U|^2]U = 0, \quad (11)$$

其亮屏蔽孤子解的精确表达式为

$$U(s, \xi) = r^{1/2} \text{sech} \left[\left(\frac{r\sigma\beta}{1+\sigma} \right)^{1/2} s \right] \times \exp \left[i \frac{\beta(r\sigma - 2\sigma - 2)}{2(1+\sigma)} \xi \right], \quad (12)$$

式中 r 为亮孤子光强的最大值与暗辐射强度之比. 考虑到(6)式和(7)式,故(12)式所表达的亮屏蔽孤子解随温度而变化.

由(12)式可以得到亮屏蔽孤子的无量纲化 FWHM 为

$$\Delta s_b = 2 \ln(1 + \sqrt{2}) \left[\left(\frac{1+\sigma}{r\sigma\beta} \right)^{1/2} \right], \quad (13)$$

可见亮屏蔽孤子的 FWHM 也是温度相关的.

对于具有双光子光折变效应的 LiNbO_3 ^[20,21], 图 3 所示,为在室温情况下,分别取 $T = 285, 291, 300$ 和 306 K 时,亮屏蔽空间孤子强度 $|U|^2$ 关于 s 的关系曲线. 其参数如下: $n_e = 2.2$, $r_{33} = 30 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$, $s_1 = s_2 = 1.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $\beta_{10} = \beta_{20} = 0.05 \text{ s}^{-1}$, $N_A =$

10^{22} m^{-3} , $\gamma_1 = 3.3 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以及 $\lambda_0 = 0.5 \text{ } \mu\text{m}$, $x_0 = 40 \text{ } \mu\text{m}$, $r_0 = 0.1$, $E_0 = 2 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ (即 $\beta = 178$)。由上述参数可以计算出 $\sigma_0 = 6.6 \times 10^6$ 。

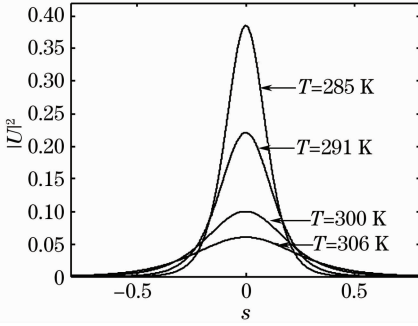


图 3 在不同温度下,小光强亮屏蔽空间孤子的强度轮廓
Fig. 3 Intensity profiles of bright screening spatial solitons at low light intensity under different temperatures

由图 3 可见,在室温变化范围内,随着介质温度的升高,小光强情况下,介质支持的亮屏蔽空间孤子的 FWHM 增加,但是介质支持的亮屏蔽空间孤子的光强却在减小。

3.3.2 小光强暗屏蔽空间孤子的温度特性

对于暗屏蔽空间孤子,在小光强情况下, $|U|^2 \ll 1$, (5)式亦可以化为非线性 Schrödinger 方程的修正形式:

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \frac{\beta(\rho+1)}{\rho+1+\sigma} [(1+\sigma) - \sigma|U|^2]U = 0, \quad (14)$$

(14)式的暗孤子解精确表达式为

$$U(s, \xi) = \rho^{1/2} \tanh \left[\left(\frac{-\rho\sigma\beta}{\rho+1+\sigma} \right)^{1/2} s \right] \times \exp \left[i \frac{\beta(\rho+1)(\rho\sigma - \sigma - 1)}{\rho+1+\sigma} \xi \right], \quad (15)$$

式中 ρ 即暗孤子光强的最大值与暗辐射强度之比,考虑到(6)式和(8)式,故(15)式所表达的暗屏蔽孤子解亦随温度而变化。

同时可以得到暗孤子的无量纲化 FWHM 为

$$\Delta s_d = 2 \ln(1 + \sqrt{2}) \left[\left(\frac{\rho+1+\sigma}{-\rho\sigma\beta} \right)^{1/2} \right], \quad (16)$$

可见暗屏蔽空间孤子的 FWHM 也是温度相关的。

对于具有双光子光折变效应的 LiNbO_3 ^[20,22], 图 4 所示,为不同温度下,暗屏蔽空间孤子强度 $|U|^2$ 关于 s 的关系曲线。其参数如下: $n_e = 2.2$, $r_{33} = 30 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$, $s_1 = s_2 = 1.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $\beta_{10} = \beta_{20} = 0.05 \text{ s}^{-1}$, $N_A = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $\gamma_1 = 3.3 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以及 $\lambda_0 = 0.5 \text{ } \mu\text{m}$, $x_0 = 40 \text{ } \mu\text{m}$, $\rho_0 = 0.1$, $E_0 = -2 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ (即 $\beta = -178$)。在室温情况

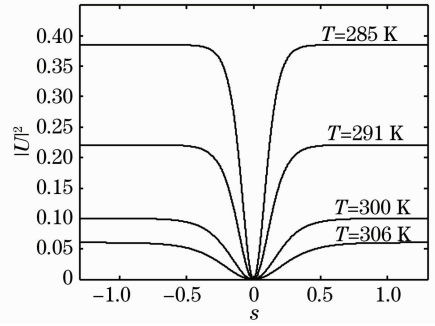


图 4 在不同温度下,小光强暗屏蔽空间孤子的强度轮廓
Fig. 4 Intensity profiles of dark screening spatial solitons at low light intensity under different temperatures

下,分别取 $T = 285, 291, 300$ 和 306 K 。

图 4 表明,在室温温度变化范围内,小光强情况下,随着光折变晶体温度的升高,介质支持的暗屏蔽空间孤子的 FWHM 明显增加,而介质支持的暗屏蔽空间孤子的最大光强却随之减小。

3.3.3 小光强情况下亮屏蔽孤子自偏转的温度特性

对于亮屏蔽孤子, $I_\infty = \rho = 0$, 在小光强情况下, $|U|^2 \ll 1$, (5)式可以化为非线性 Schrödinger 方程的修正形式:

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \frac{\beta}{1+\sigma} [(1+\sigma) - \sigma|U|^2]U = 0, \quad (17)$$

其亮屏蔽孤子解的精确表达式为

$$U(s, \xi) = r^{1/2} \text{sech} \left[\left(\frac{r\sigma\beta}{1+\sigma} \right)^{1/2} s \right] \times \exp \left[i \frac{\beta(r\sigma - 2\sigma - 2)}{2(1+\sigma)} \xi \right], \quad (18)$$

(18)式中 r 即亮孤子光强的最大值与暗辐射强度之比,考虑到(6)式和(7)式,故(18)式所表达的亮屏蔽孤子解随温度而变化。

受扩散效应的影响,双光子光折变介质中,亮屏蔽空间孤子具有自偏转特性,由文献[20]知在小光强情况下,亮屏蔽空间孤子的空间偏移 x_d 和角偏转 θ_d 分别为

$$x_d = - (k_0 r_{33} n_e^3)^2 \left(\frac{D}{15\mu} \right) \left(\frac{\sigma r}{1+\sigma} \right)^2 E_0 z^2 = - \Lambda (rz)^2, \quad (19)$$

$$\theta_d = - 2 (k_0 r_{33} n_e^3)^2 \left(\frac{D}{15\mu} \right) \left(\frac{\sigma r}{1+\sigma} \right)^2 E_0 z = - 2\Lambda r^2 z. \quad (20)$$

由于 σ 比较大,故 $\frac{\sigma}{1+\sigma} \approx 1$, 则 $\Lambda = (k_0 r_{33} n_e^3)^2 \left(\frac{D}{15\mu} \right) E_0$ 。上述二式中, $r = r(T) = \frac{I(0)}{I_{2d}(T)}$ 由

(7) 式精确表述, 所以(19)式及(20)式所表达的亮屏蔽孤子的自偏转特性亦受温度的影响。

以 LiNbO_3 为例^[20,21], 在 $r_0 = 10$, $T = 279, 285, 291, 300, 306$ 和 313 K 几种情况下, 图 5 给出了屏蔽亮空间孤子的空间偏移 x_d 受到温度的影响(小图中 x_d 的范围更小), 结果表明, 随着介质温度的降低, 亮屏蔽空间孤子在晶体中的空间偏移 x_d 随之增加。没有出现随温度进一步降低时, 空间偏移降低以及光束振幅随传播出现振荡情况^[13,18]。图 6 给出了屏蔽亮空间孤子的角偏转 θ_d 受到温度的影响(小图中 θ_d/Δ 的范围更小些)。图 5 和图 6 表明, 随着介质温度的降低, 无论是亮屏蔽空间孤子在晶体中的空间偏移 x_d 还是角偏转 θ_d 都随之增加。

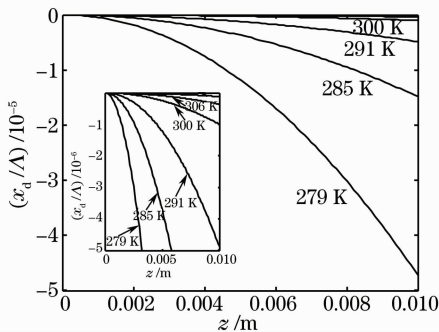


图 5 x_d/Δ 关于 z 在不同温度下的关系曲线
Fig. 5 Relation curve of x_d/Δ with z under different temperature

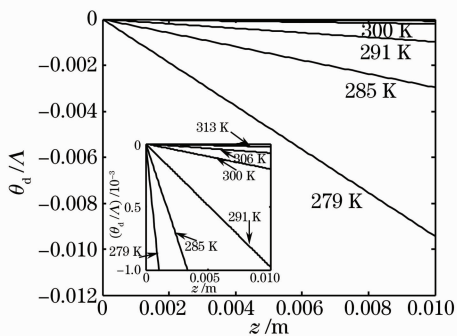


图 6 θ_d/Δ 关于 z 在不同温度下的关系曲线
Fig. 6 Relation curve of θ_d/Δ with z under different temperature

4 结 论

研究了温度对双光子光折变介质中屏蔽孤子稳定性的影响以及对亮屏蔽空间孤子自偏转特性的影响。结果表明, 在室温范围内, 随着温度的升高, 双光子光折变介质中形成光强较小的屏蔽空间孤子; 在室温范围内, 随着光折变介质温度的升高, 在较大光强情况下, 双光子光折变介质中形成 FWHM 较

小的亮屏蔽空间孤子, 而暗屏蔽空间孤子的 FWHM 变化不明显; 在室温范围内, 在小光强情况下, 随着温度升高, 双光子光折变介质中形成 FWHM 较大的屏蔽空间孤子; 随着介质温度的降低, 双光子光折变介质的温度变化明显的影响到孤子的偏转, 亮屏蔽空间孤子在介质中的空间偏移 x_d 和角偏转 θ_d 都随温度的降低而增加。该研究表明, 可以通过控制双光子光折变介质的温度来控制介质中亮屏蔽空间孤子的偏转, 从而使得光折变空间孤子有可能应用于光开关器件, 并将在光通信器件、集成光学等领域具有重要应用。

参 考 文 献

- 1 M. Segev, B. Crosignani, A. Yariv *et al.*. Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68** (7): 923~926
- 2 M. Segev, G. C. Valley, B. Crosignani *et al.*. Steady-state spatial screening solitons in photorefractive materials with external applied field [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73** (24): 3211~3214
- 3 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
- 4 M. I. Carvalho, S. R. Singh, D. N. Christodoulides. Self-deflection of steady-state bright spatial solitons in biased photorefractive crystal [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **120** (5, 6): 311~315
- 5 Dong Liangwei, Ma Lihong, Wang Hui. Self-bending effect of spatial soliton in photorefractive medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1485~1489
- 董亮伟, 马利红, 王 辉. 光折变介质中空间光孤子自弯曲现象研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1485~1489
- 6 G. C. Valley, M. Segev, B. Crosignani *et al.*. Dark and bright photovoltaic spatial solitons [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **50**(6): R4457~R4460
- 7 J. S. Liu, J. Xu, X. Zhou. Self-deflection characteristics of bright photovoltaic spatial solitons in closed-circuit realization [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(4): 220~223
- 刘劲松, 徐 军, 周 翔. 闭路光伏明空间光孤子的自偏转特性 [J]. *激光技术*, 1999, **23**(4): 220~223
- 8 Shen Yan, Zhang Guoquan, Xu Jingjun *et al.*. Dynamic behaviour of open-circuit photovoltaic spatial solitons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 528~533
- 申 岩, 张国权, 许京军 等. 开路光伏空间孤子的动态行为 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 528~533
- 9 Zhang Guangyong, Liu Jinsong. Self-deflection characteristics of dark photovoltaic spatial solitons in closed circuit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1559~1561
- 张光勇, 刘劲松. 闭路光伏暗空间孤子的自偏转特性研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1559~1561
- 10 J. S. Liu, K. Q. 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
- 11 Lu Keqing, Zhang Yanpeng, Li Bo *et al.*. Self-deflection of steady-state spatial solitons in biased photorefractive-photovoltaic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 134~138
- 卢克清, 张彦鹏, 李 博 等. 有偏亚的光伏光折变晶体中的屏蔽光伏孤子的自偏转 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 134~138
- 12 L. J. Chen, A. Partovi. Temperature and intensity dependence

- of photorefractive effect in GaAs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(21): 1456~1458
- 13 J. S. Liu, Z. H. 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
- 14 Liu Jinsong, Hao Zhonghua. Effect of temperature on the evolution of bright and dark screening-photovoltaic spatial solitons [J]. *Chin. Phys.*, 2002, **11**(3): 254~259
- 15 Liu Jinsong, Hao Zhonghua. The effect of temperature on the stability of bright screening photovoltaic spatial solitons [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(4): 279~283
刘劲松, 郝中华. 温度对屏蔽光伏明孤子稳定性的影响[J]. *激光技术*, 2002, **26**(4): 279~283
- 16 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
- 17 Ji Xuanmang, Wang Jinlai, Liu Jinsong. Temperature dependence of the low-amplitude photovoltaic bright spatial solitons in photorefractive crystal[J]. *J. 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
- 18 Zhang Guangyong, Liu Jinsong. Temperature effects on the self-deflection of screening spatial bright solitons[J]. *J. Huazhong University of Science and Technology*, 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
- 19 E. Castro-Camus, L. F. Magaña. Prediction of the physical response for the two-photon photorefractive effect [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(13): 1129~1131
- 20 C. F. Hou, Y. B. Pei, Z. X. Zhou *et al.*. Spatial solitons in two-photon photorefractive media [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(5): 053817
- 21 B. Liu, L. R. Liu, L. Y. Xu. Characteristics of recording and thermal fixing in lithium niobate[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(11): 2170~2176
- 22 D. E. Pelinovsky, Y. S. Kivshar, V. V. Afanasjev. Instability-induced dynamics of dark solitons [J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **54**(2): 2015~2032