

文章编号: 0258-7025(2005)03-0323-04

有偏压光伏光折变晶体中明暗矢量孤子的演化

卢克清, 李金萍, 赵 卫, 杨延龙, 刘红军, 陈国夫

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068)

摘要 提出了有偏压光伏光折变晶体中存在着明暗矢量孤子,它起源于对外电场的非均匀空间屏蔽和光伏效应。当光伏效应为零时,这些明暗矢量孤子就转化为明暗矢量屏蔽孤子,其物理系统就转化为明暗矢量屏蔽孤子的物理系统;当外电场为零时,这些明暗矢量孤子预言了明暗矢量光伏孤子,其物理系统预言了明暗矢量光伏孤子的物理系统。应用光束传播的方法讨论了这些明暗矢量孤子的稳定性。结果表明,当 $\sigma > 0$ 和 $(\beta + \alpha - \delta) > 0$ 时,在 $(\beta + \alpha - \delta)$ 小于某一值的区域内,这些明暗矢量孤子是稳定的;其中 σ 为控制两光束强度的参数, β 为与外偏压有关的参数, α 和 δ 为与晶体的光伏系数有关的参数;当 $\sigma < 0$ 和 $(\beta + \alpha - \delta) < 0$ 时,在 $(\beta + \alpha - \delta)$ 大于某一值的区域内,这些明暗矢量孤子也是稳定的。

关键词 非线性光学;光折变晶体;光孤子;光伏效应

中图分类号 O 437.5 **文献标识码** A

Evolution of Bright-Dark Vector Spatial Solitons in Biased Photorefractive-Photovoltaic Crystals

LU Ke-qing, LI Jin-ping, ZHAO Wei,

YANG Yan-long, LIU Hong-jun, CHEN Guo-fu

(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academic of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract The bright-dark vector spatial solitons are predicted in biased photorefractive-photovoltaic crystals, which result from both the bulk photovoltaic effect and the spatially nonuniform screening of the external bias field. When the bulk photorefractive effect can be neglected, the physical system of these bright-dark vector solitons changes into that of bright-dark vector screening solitons, and these bright-dark vector solitons change into bright-dark vector screening solitons. When the external field is absent, the physical system of these bright-dark vector solitons predicts that of bright-dark vector photovoltaic solitons, and these bright-dark vector solitons predict bright-dark vector photovoltaic solitons. The stability of these bright-dark vector solitons is discussed using a beam propagation method. When $\sigma > 0$ and $(\beta + \alpha - \delta) > 0$, where σ is the parameter controlling the intensities of the two optical beams, α and δ are the parameters related to the photovoltaic constant, and β is the parameter related to external electric field, these bright-dark vector solitons are stable in the regime of $(\beta + \alpha - \delta)$ being less than a certain value. When $\sigma < 0$ and $(\beta + \alpha - \delta) < 0$, these bright-dark vector solitons are also stable in the regime of $(\beta + \alpha - \delta)$ being greater than a certain value.

Key words nonlinear optics; photorefractive crystal; optical soliton; photovoltaic effect

收稿日期:2003-10-22;收到修改稿日期:2004-01-12

基金项目:国家自然科学基金(10474136)和中国科学院西安光学精密机械研究所所长基金资助项目。

作者简介:卢克清(1961—),男,中国科学院西安光学精密机械研究所研究员,博士,主要从事非线性光学的研究。

E-mail:kq.lu@263.net

1 引 言

光折变空间光孤子是人们近年来一直感兴趣的研究领域^[1~11]。已经发现自陷光束发生在两个横向上,并且在微瓦功率的水平上能观察到自陷光束形成的空间光孤子。迄今为止,已预言并验证在介电晶体内存在着两类稳态光折变空间光孤子:屏蔽孤子^[3]和光伏孤子^[4]。有趣的稳态空间光孤子是我们近来提出的有偏压光伏光折变晶体中的屏蔽光伏孤子^[5],在适当的条件下,屏蔽光伏孤子的物理系统可以转化为屏蔽孤子和光伏孤子的物理系统,屏蔽孤子和光伏孤子的研究可以转化为屏蔽光伏孤子的研究上^[6]。人们发现当两光束的强度近似相等时就会在有偏压的非光伏光折变晶体中产生自耦合明暗矢量屏蔽孤子^[7]。这些明暗矢量屏蔽孤子的存在与外偏压的极性无关,但只有当外偏压的极性为正时,它才是稳定的。我们从理论上提出了在有偏压的光伏光折变晶体 LiNbO₃ 中存在着明暗矢量孤子,但对它的稳定性并没有讨论^[8]。本文证明了在加外电压的一般光伏光折变晶体中存在着明暗矢量孤子,并应用光束传播的方法讨论了这些明暗矢量孤子的稳定性。

2 明暗矢量孤子的演化方程及其解

首先,考虑一光束在一块光伏光折变晶体中沿 z 轴方向传播, z 轴与该晶体的光轴 c 的夹角为 θ ,并且该光束只沿 x 方向进行衍射。其次,假定沿 x 方向施加外电压。当 θ 取适当的值时,这束光在这块光伏光折变晶体中的 e 光和 o 光分量的介电常数的变化相等^[7, 8],即 $\Delta\epsilon_e = \Delta\epsilon_o$,其中 $\Delta\epsilon_e = -r_{\text{eff},e}n_e^4 E_{\text{sc}}$ 和

$\Delta\epsilon_o = -r_{\text{eff},o}n_o^4 E_{\text{sc}}$ 表示相对介电常数张量在对角线上的扰动, $r_{\text{eff},e}$ 和 $r_{\text{eff},o}$ 分别为 e 光和 o 光的有效电光系数, n_e 为这种情况下 e 光的折射率, n_o 为 o 光的折射率, E_{sc} 为光波感应的空间电荷场,并且非对角线上的元素 $\Delta\epsilon_{eo}$ 和 $\Delta\epsilon_{oe}$ 为零。根据 e 光和 o 光光场与慢变化包络 ϕ_e 和 ϕ_o 的关系,由亥姆霍兹方程得到近轴自耦合非线性方程

$$2ik_e \frac{\partial \phi_e}{\partial z} + \frac{\partial^2 \phi_e}{\partial x^2} + k^2 \Delta\epsilon \phi_e = 0, \quad (1)$$

$$2ik_o \frac{\partial \phi_o}{\partial z} + \frac{\partial^2 \phi_o}{\partial x^2} + k^2 \Delta\epsilon \phi_o = 0, \quad (2)$$

式中 $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e = \Delta\epsilon_o$; $k_e = kn_e$; $k_o = kn_o$; $k = 2\pi/\lambda$; λ 为光波在自由空间的波长。另一方面,在强偏压的条件下,光波感应的空间电荷场为^[6]

$$E_{\text{sc}} = -(H\eta + E_p\sigma\eta) \frac{I_\infty + I_d}{I + I_d} + E_p \frac{I_\infty - I}{I + I_d}, \quad (3)$$

式中 $I = I(x, z)$ 为光束的强度; I_d 为所谓的暗辐射度; $I_\infty = I(x \rightarrow \pm\infty)$; H 为外电压, $\eta = \left\{ \int_{-l/2}^{l/2} [(I_\infty + I_d)/(I + I_d)] dx \right\}^{-1}$; $\sigma = \int_{-l/2}^{l/2} [(I_\infty - I)/(I + I_d)] dx$;

l 为应用于晶体两电极之间的距离。 $E_p = \kappa\gamma N_A/e\mu$ 为光伏场常数; κ 为光伏常数; γ 为载流子复合速率; N_A 为负电荷受主密度; e 为基本电荷; μ 为电子迁移率。对于两相互垂直的偏振光,总光强是两光束的坡印亭矢量的叠加,即 $I = (n_e/2\eta_0)|\phi_e|^2 + (n_o/2\eta_0)|\phi_o|^2$ 。其中, $\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ 。为了便于分析,采用无量纲变量^[7, 8]: $\phi_e = (2\eta_0 I_d/n_e)^{1/2} U$; $\phi_o = (2\eta_0 I_d/n_o)^{1/2} V$; $\xi = z/(k_o x_0^2)$; $s = x/x_0$ 。其中, x_0 为任意空间宽度。由此得到归一化光波包络 U 和 V 满足动态演化方程

$$i(n_e/n_o)U_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - (\alpha + \beta)(\rho + 1) \frac{U}{1 + |U|^2 + |V|^2} + \delta \frac{[\rho - (|U|^2 + |V|^2)]U}{1 + |U|^2 + |V|^2} = 0, \quad (4)$$

$$iV_\xi + \frac{1}{2}V_{ss} - (\alpha + \beta)(\rho + 1) \frac{V}{1 + |U|^2 + |V|^2} + \delta \frac{[\rho - (|U|^2 + |V|^2)]V}{1 + |U|^2 + |V|^2} = 0, \quad (5)$$

式中 $\rho = I_\infty/I_d$; $\beta = (kx_0)^2(\omega\eta/2)H$; $\alpha = (kx_0)^2(\omega\sigma\eta/2)E_p$; $\delta = (kx_0)^2(\omega/2)E_p$; $\omega = r_{\text{eff},e}n_e^4 = r_{\text{eff},o}n_o^4$ 。

为了找到(4)和(5)式的明暗矢量孤子的解,展开归一化光波包络 U 和 V : $U = r^{1/2} f(s) \exp[i(n_o/n_e)\mu\xi]$ 和 $V = \rho^{1/2} g(s) \exp(i\nu\xi)$ 。其中, $f(s)$ 为明光束的包络, $0 \leq f(s) \leq 1$; $g(s)$ 为暗光束的包络, $|g(s)| \ll 1$; $r = I(0)/I_d > 0$; μ 和 ν 为光波传播常数的非线性移动。这样,由(4)和(5)式得

$$\frac{d^2 f}{ds^2} = 2 \left[\mu - \frac{(\alpha + \beta)(\rho + 1)}{1 + rf^2 + \rho g^2} + \frac{\delta(\rho - rf^2 - \rho g^2)}{1 + rf^2 + \rho g^2} \right] f, \quad (6)$$

$$\frac{d^2 g}{ds^2} = 2 \left[\nu - \frac{(\alpha + \beta)(\rho + 1)}{1 + rf^2 + \rho g^2} + \frac{\delta(\rho - rf^2 - \rho g^2)}{1 + rf^2 + \rho g^2} \right] g, \quad (7)$$

当 $f^2 + g^2 = 1$ 时,可寻找(6),(7)两式的特解。在适当的条件下,由(6)和(7)式得^[7] $\mu = [-(\alpha + \beta -$

$\delta)/\sigma]\ln(1+\sigma)-\delta; \nu=-\alpha-\beta$ 。其中, $\sigma=(r-\rho)/(1+\rho)$ 。当 e 光和 o 光的强度近似相等(即 $|\sigma|\ll 1$) 时, (6) 和(7) 式的解能够很容易地得到。这样, (4) 和(5) 式的明暗矢量孤子的解为^[7]

$$U = r^{1/2} \operatorname{sech}\{[(\beta+\alpha-\delta)\sigma]^{1/2}s\} \exp\{i(n_o/n_e)[-(\beta+\alpha)+(\beta+\alpha-\delta)\sigma/2]\xi\}, \quad (8)$$

$$V = \rho^{1/2} \tanh\{[(\beta+\alpha-\delta)\sigma]^{1/2}s\} \exp[-i(\beta+\alpha)\xi], \quad (9)$$

上式表明, 当 $(\beta+\alpha-\delta)\sigma > 0$ 时, 这些明暗矢量孤子的解是可能的。其中 σ 为控制两光束强度的参数, β 为与外偏压有关的参数, α 和 δ 为与晶体的光伏系数有关的参数。

3 明暗矢量孤子的演化

为了研究这些明暗矢量孤子的稳定性, 使用光束传播的方法, 将(8)和(9)式的归一化光波包络 U 和 V 用作输入光束的空间分布, 应用数值模拟来解(4)和(5)式。这里, 取光伏光折变晶体为 LiNbO_3 , 其参数 $E_p = 40 \text{ kV/cm}$, 它是观察自耦合矢量孤子的优质晶体^[8]。当 $\theta \approx 11.9^\circ$ 时, 在 LiNbO_3 晶体中 $\Delta\epsilon_{ee} = \Delta\epsilon_{oo}, \Delta\epsilon_{eo} = \Delta\epsilon_{oe} = 0, \omega = 235.85 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ^[8]。再取 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, $l = 1 \text{ cm}$, $x_0 = 40 \mu\text{m}$ 。一方面, 当 $\sigma > 0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta) > 0$ 时, 在 $(\beta+\alpha-\delta)$ 比较小的条件下, 取 $H = 42000 \text{ V}$, $\rho = 10$ 和 $r = 10.55$ 。图 1 给出了在这些条件下得到的明暗矢量孤子的演化曲线(文中所有图的坐标均为无量纲参量)。从图 1 可以看出, 该明暗矢量孤子是没有变化的传播。因此, 这个明暗矢量孤子是稳定的。注意: 图 1 中 $\xi = 1$ 对应矢量孤子实际的传播距离近似为 3.6 cm 。然而, 当 $\sigma > 0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta) > 0$ 时, 在 $(\beta+\alpha-\delta)$ 比较大的条件下, 图 2 给出了明暗矢量孤子的演化曲线, 其中 $H = 50000 \text{ V}$, $\rho = 10$ 和 $r = 10.55$ 。显然, 图 2(a)暗分量和图 2(b)明分量的传播是不稳定的, 它在 $\xi = 0.5$ 时就开始瓦解。另一方面, 当 $\sigma < 0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta) < 0$ 时, 在 $|\beta+\alpha-\delta|$ 比较小的条件下, 图 3 给出了明暗矢量孤子的演化曲线, 其中 $H =$

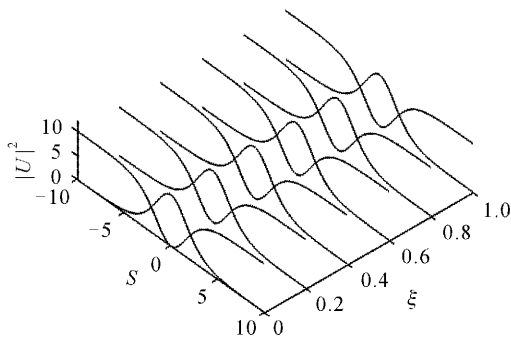


图 1 明暗矢量孤子的稳定传播曲线

Fig. 1 Stable propagation of the bright and dark components of the vector soliton when $H = 42000 \text{ V}$, $\rho = 10$, and $r = 10.55$

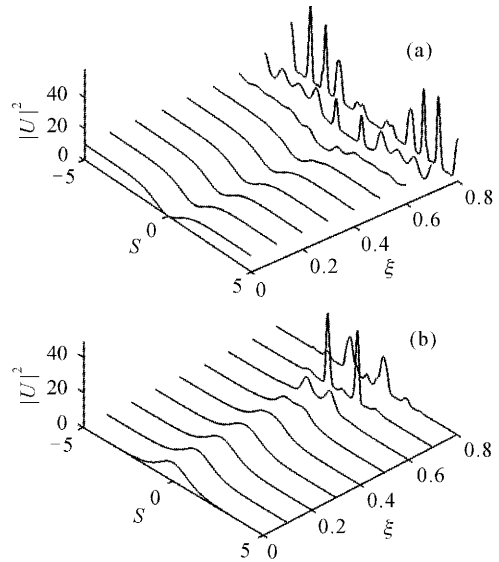


图 2 明暗矢量孤子的暗分量(a)和明分量(b)的不稳定传播曲线

Fig. 2 Unstable propagation of the (a) dark and (b) bright components of the vector soliton when $H = 50000 \text{ V}$, $\rho = 10$, and $r = 10.55$

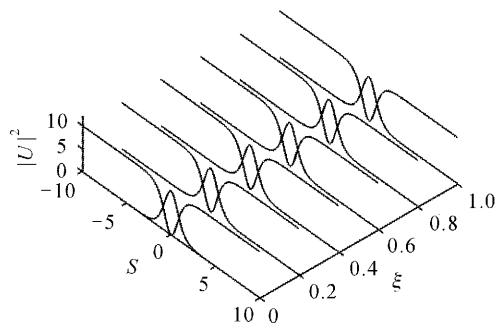


图 3 明暗矢量孤子的稳定传播曲线

Fig. 3 Stable propagation of the bright and dark components of the vector soliton when $H = 30000 \text{ V}$, $\rho = 10$, and $r = 9.45$

30000 V , $\rho = 10$ 和 $r = 9.45$ 。当 $\sigma < 0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta) < 0$ 时, 在 $|\beta+\alpha-\delta|$ 比较大的条件下, 图 4 给出明暗矢量孤子的演化曲线, 其中 $H = 15000 \text{ V}$, $\rho = 10$ 和 $r = 9.45$ 。图 4(a)暗分量和图 4(b)明分量的演化曲线表明, 这列明暗矢量孤子从 $\xi = 0$ 到 $\xi = 0.5$ 是

稳定的,在 $\xi=0.6$ 时,就出现瓦解。特别要注意的是图1和图4中所用的 $(\beta+\alpha-\delta)$ 和 σ 的大小相同,正负相反,但图4中明暗矢量孤子是不稳定的。从这些明暗矢量孤子的演化曲线可以看出,当 $\sigma>0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)>0$ 或 $\sigma<0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)<0$ 时,这些明暗矢量孤子在 $|\beta+\alpha-\delta|$ 比较小的条件下是稳定的,在 $|\beta+\alpha-\delta|$ 比较大的条件下是不稳定的;当 $\sigma>0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)>0$ 的明暗矢量孤子的稳定条件 $(\beta+\alpha-\delta)$ 的值比 $\sigma<0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)<0$ 的明暗矢量孤子的稳定条件 $|\beta+\alpha-\delta|$ 的值小。

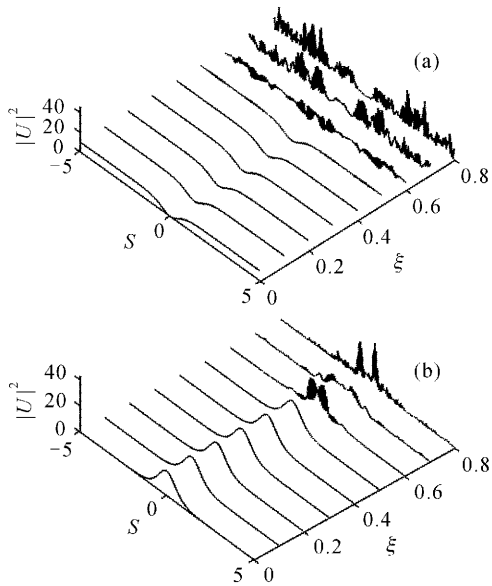


图4 明暗矢量孤子的暗分量(a)和明分量(b)的不稳定传播曲线

Fig. 4 Unstable propagation of the (a) dark and (b) bright components of the vector soliton when $H=15000$ V, $\rho=10$, and $r=9.45$

4 结 论

从理论上证明了在加外电压的一般光伏光折变晶体中存在着明暗矢量孤子,应用光束传播方法讨论了这些明暗矢量孤子的稳定性。通过分析发现,当 $\sigma>0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)>0$ 时,在 $(\beta+\alpha-\delta)$ 小于某

一值的区域内,这些明暗矢量孤子是稳定的;当 $\sigma<0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)<0$ 时,在 $(\beta+\alpha-\delta)$ 大于某一值的区域内,这些明暗矢量孤子也是稳定的; $\sigma>0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)>0$ 的明暗矢量孤子的稳定条件 $(\beta+\alpha-\delta)$ 的值小于 $\sigma<0$ 和 $(\beta+\alpha-\delta)<0$ 的明暗矢量孤子的稳定条件 $|\beta+\alpha-\delta|$ 的值。

参 考 文 献

- 1 Guo Ru, Ling Zhenfang, Chen Xiaofu *et al.*. Saturable nonlinearity in photovoltaic-photorefractive crystals under open-circuit condition [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**(11):804~805
- 2 Yan Jinren, Pan Liuxian, Zhou Guanghui. Soliton perturbations for a combined KdV-MKdV equation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**(9):625~627
- 3 D. N. Christodoulides, M. I. Carvalho. Bright, dark, and gray spatial soliton states in photorefractive media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(9):1628~1633
- 4 M. Segev, G. C. Valley, M. C. Bashaw *et al.*. Photovoltaic spatial solitons [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7):1772~1781
- 5 Lu Keqing, Tang Tiantong, Zhang Yanpeng. One-dimensional steady-state spatial solitons in photovoltaic photorefractive materials with an external applied field [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **61**(5):053822-1~053822-5
- 6 Lu Keqing, Zhang Yanpeng, Tang Tiantong *et al.*. Incoherently coupled steady-state soliton pairs in biased photorefractive-photovoltaic materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**(5):056603-1~056603-9
- 7 M. I. Carvalho, S. R. Singh, D. N. Christodoulides *et al.*. Dark and bright vector spatiam solitons in biased photorefractive media [J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **53**(1):R53~R56
- 8 Lu Keqing, Qian Shixiong, Zhao Wei *et al.*. Steady-state bright-dark vector spatial solitons in biased photorefractive-photovoltaic crystals [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **209**(4~6):437~444
- 9 She Weilong, Zheng Xiguang, Ni Xiaohui *et al.*. A vector theory on spatial solitons in Kerr media [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(10):1346~1349
- 10 Lu Keqing, Zhao Wei, Qian Shixiong *et al.*. Incoherently coupled low-amplitude soliton pairs in biased photorefractive-photovoltaic crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):563~566
- 11 卢克清,赵卫,钱士雄等. 有偏压光伏光折变晶体中低振幅非相干耦合孤子对[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):563~566
- 11 Keqing Lu, Xiangping Zhu, Wei Zhao *et al.*. Low-amplitude vector screening solitons [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8):483~485