

# 光伏光折变晶体中的高斯光束孤波演化特性调节\*

谭欣<sup>1</sup> 郝中华<sup>1</sup> 刘劲松<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071  
<sup>2</sup> 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**提要** 研究了分压电阻对高斯光束在加偏压的光伏光折变晶体中演化特性的影响。结果表明,通过调节分压电阻来改变外电场强度,可以在晶体中传播不稳定的高斯光束演化趋于稳定的亮孤子波。

**关键词** 非线性光学, 空间孤子, 高斯光束

**中图分类号** O437.5 **文献标识码** A

## Modulation of Solitary Evolution of Gaussian Beams in Photovoltaic-photorefractive Crystals

Tan Xin<sup>1</sup> HAO Zhong-hua<sup>1</sup> LIU Jin-song<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Xidian University, Xi'an 710071  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The load resistance can impact the propagation of a Gaussian beam in a biased photovoltaic-photorefractive crystal. The results show that, changing the load resistance can change the bias field intensity, and make a Gaussian beam evolve into a stable bright soliton when propagating in a biased photovoltaic-photorefractive crystal.

**Key words** nonlinear optics, spatial soliton, Gaussian beam

### 1 引言

最近从理论上证明存在的一种新型稳态光折变空间孤子<sup>[1,2]</sup>,即屏蔽光伏孤子。给定的光伏光折变晶体在提供合适的外电场后,它能够支持一种稳定的屏蔽光伏亮孤子<sup>[3]</sup>。当一高斯光束与同参数下的晶体相匹配时,该光束在晶体中也能演化成屏蔽光伏亮孤子<sup>[4]</sup>,反之则不行。由于外加电场强度对高斯光束在光伏光折变晶体中的演化特性有显著影响<sup>[3]</sup>,提出通过改变负载电阻值来调节外电场,研究其对高斯光束演化特性的调节。

### 2 基本理论

光伏光折变晶体和电阻  $R$  串连,外电场偏压为  $V_A$ 。如果光波的空间展宽远小于晶体宽度  $W$ ,则得到近似表达式:

$$E_0 = \frac{V_0}{W} = \frac{1}{W}(V_A - V_R)$$

$E_0$  和  $V_0$  分别代表晶体电极间的电压和电场强度。 $V_R = JRS$ ,  $V_R$  是电阻上的电压,  $S$  是晶体的截面积,  $J$  是电流密度。设有一束只在  $x$  方向衍射的光波沿  $z$  方向在一个沿  $x$  方向施加外电场的光伏光折变晶体中传播。从光伏光折变晶体满足的速率方程,连续性方程, Poisson 方程和 Gauss 定律中出发,联立光波满足的傍轴方程<sup>[1,2]</sup>,建立光波包络的演化方程,并采用下列无量纲变量简化方程:

$$\xi = z/kx_0^2, \quad s = x/x_0$$

和光波的电场分量  $E$  的慢变化包络,

$$\phi = \left( \frac{2\eta_0 I_d}{n_e} \right)^{1/2} U$$

其中  $x_0$  为任意空间宽度,

$$k = k_0 n_e, \quad k_0 = 2\pi/\lambda_0,$$

$\lambda_0$  是光波在自由空间的波长。

$$(\hat{n}_e)^2 = n_e^2 - n_e^4 r_{\text{eff}} E_{\text{SC}}^{[5]},$$

$r_{\text{eff}}$  是有效电光系数,  $n_e$  是晶体非常光折射率,  $E_{\text{SC}}$

国家自然科学基金(69878022)资助课题。

是光波感应出的空间电荷场。使  $I = I_d |U|^2$ 。得到归一化的光波包络  $U$  满足如下动态演化方程<sup>[5]</sup>：

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{SS} - g\beta(\rho + 1) \frac{U}{1 + |U|^2} - \alpha \frac{(g\rho - |U|^2)U}{1 + |U|^2} = 0 \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} \rho &= I_\infty / I_d \\ \beta &= (k_0 x_0)^2 (n_c^4 r_{\text{eff}} / 2) E_A \\ \alpha &= (k_0 x_0)^2 (n_c^4 r_{\text{eff}} / 2) E_P \end{aligned}$$

其中  $E_P = k_P \gamma_R N_A / (e\mu)$  为光伏场常数,  $E_A = V_A / W$  为外加电场,  $I_\infty = I(x \rightarrow \pm \infty, z)$ ,  $I = I(x, z)$  是光波光强, 同  $\phi$  的关系满足 Poynting 定律, 即

$$I = (n_c / 2\eta_0) |\phi|^2, \quad \eta_0 = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2}$$

$I_d$  是暗辐射光强,  $N_A$  是施主密度,  $N_D$  是未电离施主密度,  $\gamma_R$  是载流子复合速率,  $\mu$  是电子迁移率,  $e$  是基本电荷,  $k_P$  是光伏常数。电阻项系数

$$\begin{aligned} g &= \frac{1}{1 + \rho R S (I_\infty + I_d)}, \\ \rho &= \frac{s_i (N_D - N_A) e \mu}{r_R N_A W} \end{aligned}$$

从(1)式出发, 利用亮孤子解的边界条件

$$y(0) = 1, \quad y(0) = 0, \quad y(s \rightarrow \pm \infty) = 0$$

从而,  $\rho = I_\infty / I_d = 0$ , 并令

$$U = r^{1/2} y(s) \exp(iv\xi),$$

其中  $r = I(0) / I_d > 0$ ,

可以得到屏蔽光伏亮孤子解为<sup>[5]</sup>：

$$[2(g\beta + \alpha)]^{1/2} s =$$

$$\pm \int_{y(s)}^1 \frac{r^{1/2} dy}{[\ln(1 + ry^2) - y^2 \ln(1 + r)]^{1/2}} \quad (2)$$

显然, 只有当  $(g\beta + \alpha) > 0$  时, 加外电场的光伏光折变晶体中才能形成屏蔽光伏亮孤子。

### 3 高斯光束演化特性的调节

以钛酸钡晶体为例, 给定外电场强度, 选取高斯光束  $U_0 = \sqrt{0.4} \exp(-s^2/0.2^2)$  为入射光束。然后, 取不同负载电阻值, 研究此光束在晶体中的动态演化特性, 这可从数值求解(1)式得到。钛酸钡晶体参数为  $n_c = 2.18$ ,  $\gamma_{\text{eff}} = 80 \times 10^{-12}$  m/V, 再取  $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $x_0 = 40 \mu\text{m}$ 。取  $E_0 = 2.33 \times 10^6$  V/m,  $E_P = 0$  V/m ( $\alpha = 0$ )。

由图1可见, 当晶体参数给定的情况下, 改变分压电阻值可以调节高斯光束在晶体中的演化特性, 已知亮孤子波强度包络宽度和  $|\alpha + g\beta|$  成反比,  $|\alpha + g\beta|$  越大, 亮孤子波强度包络宽度越窄, 反之则越宽。因此调节分压电阻值可以改变晶体支持的明孤子包络, 从而改变了入射高斯光束与晶体匹配情况。对照图1和图2可以看出, 当  $g = 0.5$  时, 入射高斯光束与晶体匹配(如图2), 在晶体中演化为稳定的亮孤子波[如图1(b)]; 当改变  $g$  使入射高斯光束包络截面与晶体支持的亮孤子包络偏离较大时(如图2), 高斯光束在晶体中会呈现振幅膨胀压缩现象[如图1(a)和(c)]。

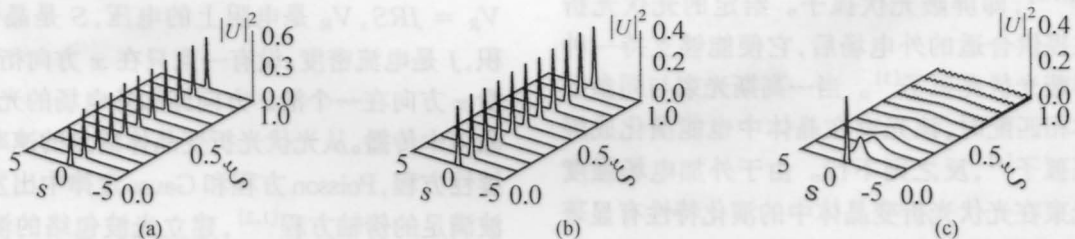


图1 取不同分压电阻值后高斯光束在钛酸钡中动态演化图. (a)  $g=0.9$ ; (b)  $g=0.5$ ; (c)  $g=0.1$

Fig. 1 Dynamical evoluntins of a Gaussian beam in BaTiO<sub>3</sub> under different resistance. (a)  $g=0.9$ ; (b)  $g=0.5$ ; (c)  $g=0.1$

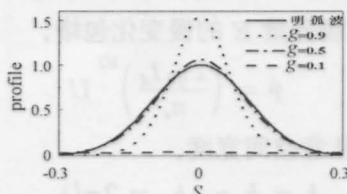


图2 屏蔽光伏亮孤子空间包络和  $g=0.1$ ,  $g=0.5$ ,  $g=0.9$  时三种高斯光束出射包络截面比较

Fig. 2 Comparison of profiles of the SP bright soliton between these of the three output Gaussian beams

由上述分析中得出, 改变负载电阻值可以调节高斯光束在晶体中的演化特性。那么, 若入射高斯光束与晶体不匹配, 在晶体参数不变的情况下, 通过调节分压电阻能使其与晶体匹配而稳定传播。由图3可见, 当入射波振幅(或束腰)大于(或小于)晶体支持的亮孤子振幅(或束腰)时, 改变  $g$  使  $|\alpha + g\beta|$  减小(或增大), 能使此不稳定入射波[图3(a1), (b1)]演化成稳定的亮孤子波[图3(a2), (b2)]。

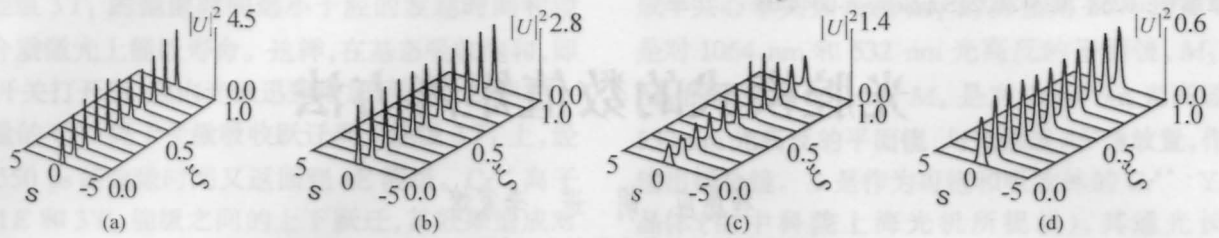


图3 当  $g=0.5$  晶体参数不变时, (a1)入射波为  $U_1(s, \xi) = 2.5U_0(s, \xi)$ ; (b1)入射波为  $U_1 = \sqrt{0.4} \exp[-s^2/(0.2+0.3)^2]$  其在晶体中都不能演化为稳定的亮孤子波. (a2)使  $g=0.25$  时 (b2)使  $g=0.1$  时, 其可以演化为稳定的亮孤子波  
 Fig.3 An input Gaussian beam (a1)  $U_1(x, \xi) = 2.5U_0(s, \xi)$  (b1)  $U_1 = \sqrt{0.4} \exp[-s^2/(0.2+0.3)^2]$  can not evolve into a stable SP bright soliton at  $g=0.5$ . (b) it can evolve into a stable SP bright soliton at (a2)  $g=0.25$  (b2)  $g=0.1$

### 4 结 论

调节分压电阻, 可以在晶体中传播不稳定的高斯光束演化趋于稳定的亮孤子波。入射波高斯光束在晶体中的演化特性同晶体所支持的亮孤子波的匹配情况相关。由计算和分析可以看出, 对于给定晶体、光伏场和外电场参数, 当入射高斯光束包络截面与晶体支持的屏蔽光伏亮孤子包络偏离较大时, 其不能在晶体中稳定传播。调节分压电阻值改变了加在晶体上的外电场强度, 实质上是在改变晶体所支持的屏蔽光伏亮孤子的空间包络, 使入射高斯光束和晶体相匹配, 使不稳定传播光束演化为稳定的亮孤子波。

### 参 考 文 献

- 1 J. Liu, K. Lu, J. Xu *et al.*. Properties of screening-photovoltaic spatial solitons in biased photovoltaic-photorefractive crystals. *Proc. SPIE*, 1998, **3554**:81~89
- 2 Liu Jinsong, Lu Keqing. Screening-photovoltaic spatial solitons in biased photovoltaic-photorefractive crystals and their self-deflection. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1999, **16** (4):550~555
- 3 刘劲松, 张都应, 梁昌洪. 屏蔽光伏亮孤子的稳定性. *中国物理*, 2000, **9**(9):667~671
- 4 P. Gunter, J. P. Huignard eds.. *Photorefractive Materials and Their Applications I*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 1~130
- 5 Liu Jinsong. Universal theory of steady state one-dimensional photorefractive solitons. *Chinese Physics*, 2001, to be published