

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0139-05

晶体损耗对高斯光束孤波演化特性的影响^{*}

张都应 刘劲松 梁昌洪

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

摘要: 研究了晶体损耗对高斯光束在光伏光折变晶体中孤波演化特性的影响。结果表明, 对于给定的高斯光束和光伏光折变晶体, 损耗将造成入射高斯光束传播时振幅和横截面的不断变化, 长距离传播时将最终造成入射波的发散。损耗对强失配和弱失配的入射高斯波所造成的影响不同。弱失配时, 光波横截面随传播距离增大而不断扩大, 振幅随传播距离单调下降; 强失配时, 横截面先压缩后膨胀, 光波中心振幅则经历先下降后增大, 再下降的过程。同时我们还发现, 在一定条件下, 晶体损耗能使振幅失配的高斯光束演化成匹配的高斯光束, 并最终演化成稳定的明孤波。

关键词: 高斯光束; 光折变效应; 空间光孤子

中图分类号: O437 文献标识码: A

1 引 言

屏蔽光伏孤子是最近从理论上证明存在的一种新型稳态光折变空间孤子^[1,2]。与另外两种稳态光折变空间孤子——屏蔽孤子^[3~8]和光伏孤子^[9,10]不同, 屏蔽光伏孤子的特性取决于两个参数 α 和 β 。 α 同光伏场有关, β 同外电场有关。相比之下, 屏蔽孤子仅同 β 有关, 光伏孤子仅同 α 有关。这是因为, 屏蔽光伏孤子形成于加外电场的光伏光折变晶体中, 源于对外电场的非均匀空间屏蔽和光伏效应两个物理过程, 而屏蔽孤子形成于加外电场的非光伏光折变晶体中, 源于对外加电场的非均匀空间屏蔽, 光伏孤子形成于不加外电场的光伏光折变晶体中, 源于光伏效应。对于一块给定的光伏光折变晶体, 在提供适当的外加电场后, 它就有可能支持一种稳定的屏蔽光伏孤子^[11]。当入射到晶体上的光波就是这种孤子波时, 在忽略损耗和扩散效应的情况下, 在晶体中自然能形成一个稳定的屏蔽光伏明孤子。在实际应用中, 入射的光束往往不是这种孤子波, 例如, 可能是一种高斯光束。我们已经研究了高斯光束在光伏光折变晶体中的孤波演化特性^[12], 但损耗对这种演化造成的影响尚未讨论。本文在忽略扩散效应的情况下, 通过数值求解光波演化方程, 研究了晶体损耗对高斯光束在光伏光折变晶体中演化特性

的影响。结果表明, 损耗除了造成入射光波振幅随传播距离的增大而不断减小这一必然结果外, 还造成了入射波横截面的改变。同时, 入射光强不同的高斯波, 也表现出了不同的变化特征。也就是说, 损耗不仅仅只造成入射高斯波振幅的衰减, 还改变了它的空间形状。所以, 研究损耗对高斯光束孤波演化特性的影响, 无论是对于了解高斯光束进而了解孤子本身的特性, 还是对孤子应用去向的预测, 都有十分重要的意义。

2 基本理论

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。光波满足的傍轴方程为^[12,12]

$$i\varphi_z + i\frac{\Omega}{2}\varphi + \frac{1}{2k}\varphi_{xx} - \frac{k_0}{2}(n_e^3 r_{\text{eff}} E_{\text{sc}})\varphi = 0 \quad (1)$$

式中, φ 为光波的电场分量 E 的慢变化包络, 满足关系 $E = x\varphi(x, z)\exp(ikz)$, $\varphi_z = \partial\varphi/\partial z$, $\varphi_{xx} = \partial^2\varphi/\partial x^2$, Ω 为晶体的吸收系数, $k = k_0 n_e$, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为光波在自由空间的波长, $(n'_e)^2 = n_e^2 - n_e^4 r_{\text{eff}} E_{\text{sc}}$ ^[8], r_{eff} 为有效电光系数, n_e 为晶体非常光折射率, E_{sc} 为光波感应出的空间电荷场, 可从光伏光折变晶体满足的速率方程、连续性方程、泊松方程和高斯定律中推出。在忽略扩散效应的情况下^[1,2]

$$E_{\text{sc}} = E_0 \frac{I_{\infty} + I_d}{I + I_d} + E_p \frac{I_{\infty} - I}{I + I_d} \quad (2)$$

其中, $E_p = k_p \gamma_R N_A / (e\mu)$ 为光伏场常数, E_0 为外加

^{*} 国家自然科学基金(69878022)资助课题。

E-mail: zhduying@263.net

收稿日期 2000-08-23; 收到修改稿日期 2000-11-20

电场, $I_\infty = I(x \rightarrow \pm \infty, z)$, $I = I(x, z)$ 为光波的光强, 同 φ 的关系满足坡印廷定律, 即 $I = (n_c/2\eta_0)|\varphi|^2$, $\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$, I_d 为暗辐射光强, N_A 为受主密度, γ_R 为载流子复合速率, μ 为电子迁移率, e 为基本电荷, k_p 为光伏常数. 采用下列无量纲变量简化方程: $\xi = z/kx_0^2$, $s = x/x_0$ 和 $U = 2\eta_0 I_d/n_c$, 其中 x_0 为一个任意的空间宽度, 得到归一化的光波包络 U 满足如下动态演化方程

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} + i\Gamma U + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial s^2} - \beta(\rho + 1) \frac{U}{1 + |U|^2} - \alpha \frac{(\rho - |U|^2)U}{1 + |U|^2} = 0. \quad (3)$$

其中

$$\beta = (k_0 x_0)^2 \frac{n_c^4 r_{\text{eff}}}{2} E_0, \quad \alpha = (k_0 x_0)^2 \frac{n_c^4 r_{\text{eff}}}{2} E_p, \\ \rho = I_\infty/I_d, \quad \Gamma = \Omega k x_0^2/2.$$

当光伏光折变晶体和外加电场给定后, 晶体的参数 α 和 β 就确定了. 在一定条件下, 该晶体中就能形成一种屏蔽光伏明孤子. 如果入射到晶体中的光波就是这种孤子波, 在忽略损耗的情况下, 这种光波会在保持其光强和空间形状不变的情况下直线传播. 如果入射到晶体上的光波不是这种孤子波而是

高斯光束, 则不同的高斯光束会表现出不同的演化特性. 有些高斯光束会在入射到晶体后不久, 演化成稳定的孤子波, 我们称这样的高斯光束为同此晶体匹配的高斯光束^[12]. 而另一些高斯光束则不能演化成稳定的孤子波, 我们称这样的高斯光束为同此晶体失配的高斯光束^[12].

考虑损耗后, 高斯光束的孤波演化又呈现出新的特征. 下面分别讨论晶体损耗对这两种情况下高斯光束在加外电场的光伏光折变晶体中演化特性的影响.

3 晶体损耗对匹配高斯光束演化特性的影响

考虑入射光波为

$$U = \sqrt{1.1} \exp(-s^2/0.44^2)$$

的高斯光束在 $\alpha = -100$, $\beta = 135$ 的光伏光折变晶体中的演化特性. 图 1 给出了数值求解 (3) 式得到的 Γ 分别为 0、1.2 和 2.4 时该高斯光束在晶体中的演化过程. 结果表明, 对于匹配的入射高斯波, 损耗造成入射波振幅的单调下降和横截面的单调增大(图 1) 在损耗因子 Γ 较大时, 入射波将很快发散.

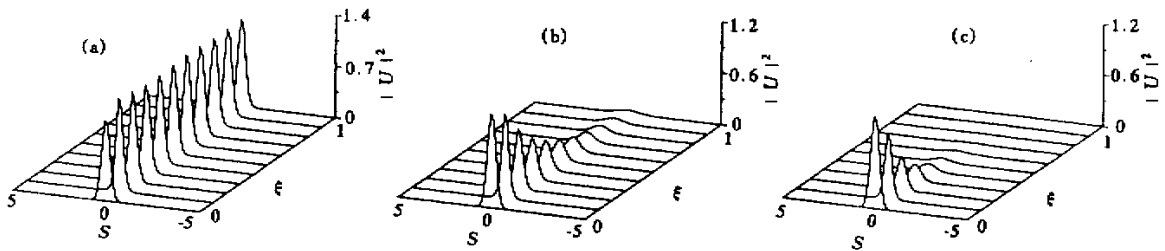


Fig. 1 The evolution of a Gaussian beam $U = \sqrt{1.1} \exp(-s^2/0.44^2)$ as an incident beam in a photovoltaic-photorefractive crystal with an applied field, $\alpha = -100$, $\beta = 135$. (a) $\Gamma = 0$; (b) $\Gamma = 1.2$; (c) $\Gamma = 2.4$

4 晶体损耗对束腰失配高斯光束演化特性的影响

文献[12]已经证明, 高斯光束 $U = \sqrt{1.1} \times \exp(-s^2/0.44^2)$ 同参数为 $\alpha = -100$, $\beta = 135$ 的屏蔽光伏明孤子的空间函数形式非常接近, 因此它能在参数为 $\alpha = -100$, $\beta = 135$ 的加外电场的光伏光折变晶体中很快地演化成稳定孤子波. 现在如果保持晶体参数不变, 而高斯光束的空间形状有较大改变, 则光束的演化特征将会有很大改变. 下面先讨论束腰失配时晶体损耗对入射高斯波演化特性的影响. 为此, 引入一个束腰失配参数 $\Delta\sigma$, 将此时的高

斯光束表示为 $U = \sqrt{1.1} \exp[-s^2/(0.44^2 + \Delta\sigma^2)]$. 图 2 和图 3 分别给出了数值求解 (3) 式得到的束腰弱失配 ($\Delta\sigma = 0.04$) 和强失配 ($\Delta\sigma = 0.4$) 的高斯光束在 $\alpha = -100$, $\beta = 135$, Γ 分别为 0、1.2 和 2.4 的晶体中的演化过程. 结果表明, 弱失配情况下, 演化的强度特性与匹配高斯波演化的强度特性相似, 横截面先压缩后膨胀(图 2); 而强失配时, 损耗造成入射高斯波的横截面明显的先压缩后膨胀现象(图 3), 光波中心振幅则经历振荡下降的过程.

图 4 分别给出了 $\Delta\sigma = 0, 0.04, 0.4$ 时, 高斯光束 $U = \sqrt{1.1} \exp[-s^2/(0.44 + \Delta\sigma)^2]$ 在晶体中动态演化的归一化强度包络.

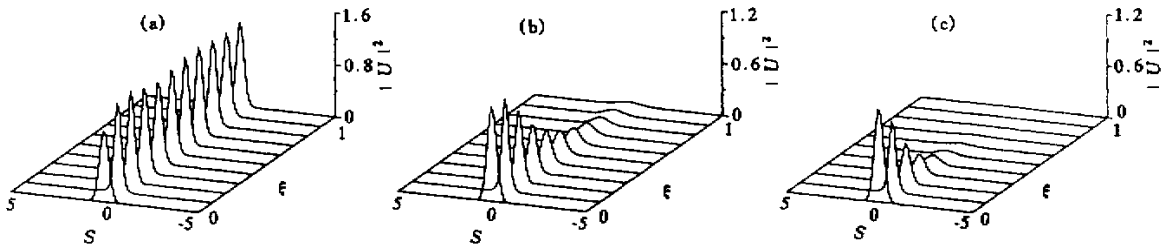


Fig. 2 The evolution of a Gaussian beam $U = \sqrt{1.1} \exp[-s^2 / (0.44 + \Delta\sigma)^2]$ as an incident beam in a photovoltaic-photorefractive crystal with an applied field, $\alpha = -100, \beta = 135, \Delta\sigma = 0.04$. (a) $\Gamma = 0$; (b) $\Gamma = 1.2$; (c) $\Gamma = 2.4$

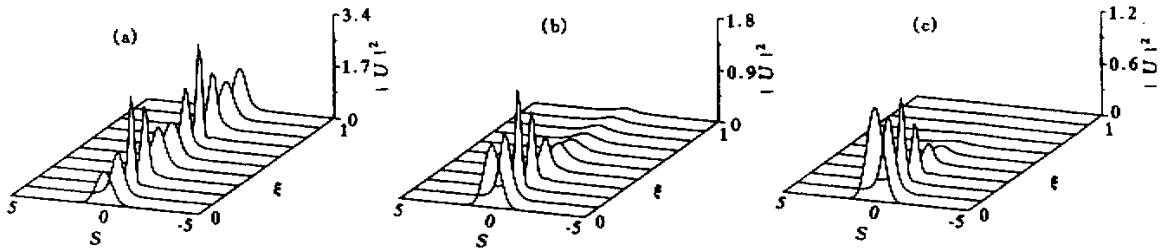


Fig. 3 The evolution of a Gaussian beam $U = \sqrt{1.1} \exp[-s^2 / (0.44 + \Delta\sigma)^2]$ as an incident beam in photovoltaic-photorefractive crystal with an applied field, $\alpha = -100, \beta = 135, \Delta\sigma = 0.4$. (a) $\Gamma = 0$; (b) $\Gamma = 1.2$; (c) $\Gamma = 2.4$

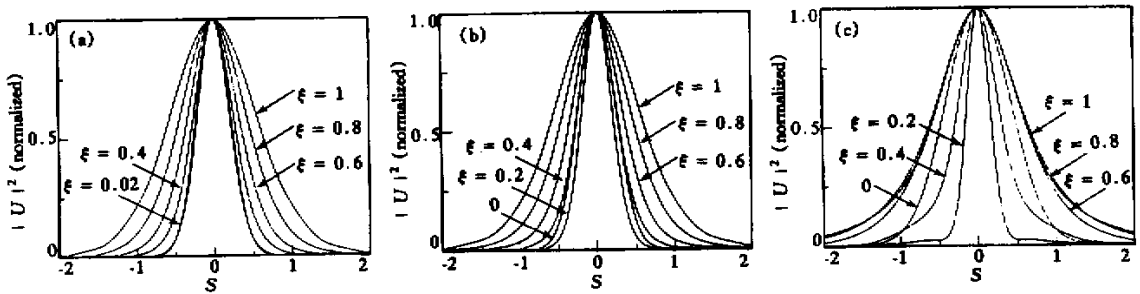


Fig. 4 Normalized evolution envelope of a Gaussian beam in a photovoltaic-photorefractive crystal with an applied field.

$U = \sqrt{1.1} \exp[-s^2 / (0.44 + \Delta\sigma)^2], \alpha = -100, \beta = 135, \Gamma = 1.2$. (a) $\Delta\sigma = 0$; (b) $\Delta\sigma = 0.04$; (c) $\Delta\sigma = 0.4$

5 晶体损耗对振幅失配高斯光束演化特性的影响

现在来讨论晶体损耗对振幅失配高斯光束传输特性的影响。为此,引入一个振幅失配参数 N , 将此

时的高斯光束表示为 $U = \sqrt{N} \exp(-s^2 / 0.44^2)$, 图 5 和图 6 分别给出了数值求解 (3) 式得到的振幅弱失配 ($N = 2$) 和强失配 ($N = 5$) 的高斯光束在 $\alpha = -100, \beta = 135, \Gamma$ 分别为 0、1.2 和 2.4 的晶体中的演化过程。

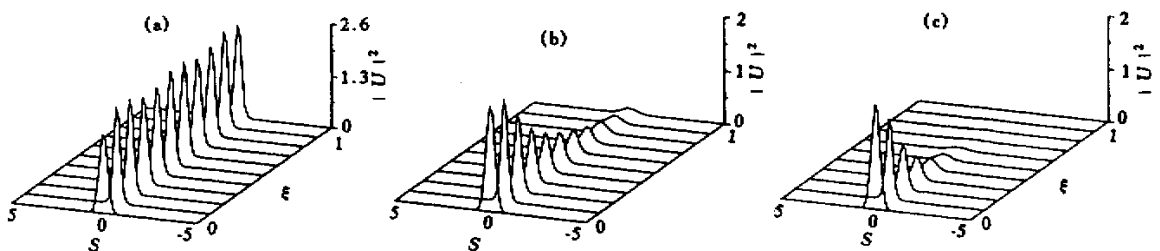


Fig. 5 The evolution of a Gaussian beam $U = \sqrt{N} \exp(-s^2 / 0.44^2)$ as an incident beam in photovoltaic-photorefractive crystal with an applied field, $\alpha = -100, \beta = 135, N = 2$. (a) $\Gamma = 0$; (b) $\Gamma = 1.2$; (c) $\Gamma = 2.4$

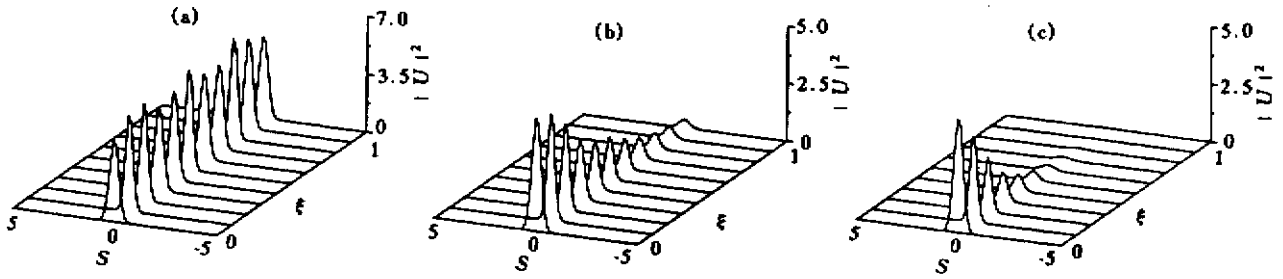


Fig. 6 The evolution of a Gaussian beam $U = \sqrt{N} \exp(-s^2/0.44^2)$ as an incident beam in photovoltaic-photorefractive crystal with an applied field, $\alpha = -100$, $\beta = 135$, $N = 5$. (a) $\Gamma = 0$; (b) $\Gamma = 1.2$; (c) $\Gamma = 2.4$

结果表明,弱失配情况下,晶体损耗造成入射波振幅的单调下降和束腰的单调增加,强失配情况下,损耗造成高斯波束振幅和束腰的振荡性变化,和束腰失配时的情况类似。

6 损耗对高斯波束的整形

图 7 给出了当 $\xi \geq 0.5$ 以后令 $\Gamma = 0$ 时高斯光束在晶体中的孤子波演化特性。图 7(a) 表明晶体损耗使得振幅失配的高斯光束演化成了匹配的高斯

光束。图 7(b) 表明晶体损耗使得振幅及束腰均失配的高斯光束演化成了匹配的高斯光束。同时,在损耗相对于入射光强较小时,高斯光束演化明显出现了能量集中的现象,即光束横截面压缩,中心强度加大。这一现象的实际意义在于,对于给定的和晶体失配的高斯光束,损耗实现了对该高斯光束的整形。实际应用中可通过将有损耗的晶体在适当位置进行切割,让失配的高斯光束通过切割后的晶体,则输出波成为同参数无耗晶体相匹配的孤子波。

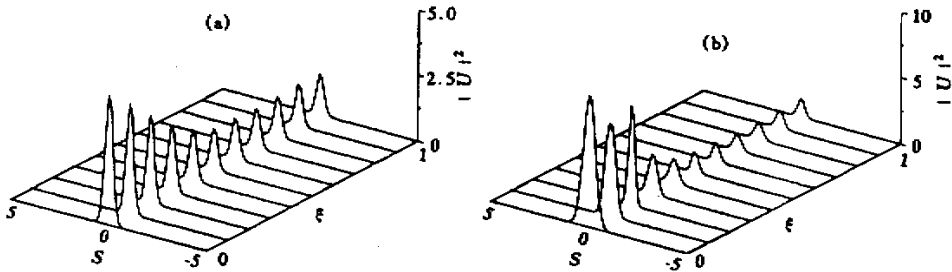


Fig. 7 The evolution of a Gaussian beam as an incident beam in a photovoltaic-photorefractive crystal with an applied field.

(a) $U = \sqrt{5} \exp(-s^2/0.4^2)$, $\alpha = -100$, $\beta = 135$, $\Gamma = 1.2$ while $\xi < 0.5$ and $\Gamma = 0$ while $\xi \geq 0.5$;

(b) $U = \sqrt{10} \exp(-s^2/0.6^2)$, $\alpha = -100$, $\beta = 135$, $\Gamma = 2.4$ while $\xi < 0.5$ and $\Gamma = 0$ while $\xi \geq 0.5$

结论 损耗将造成高斯波传播时振幅的不断减弱和横截面的不断增大,长距离传播时将最终造成高斯波的发散。一方面,在弱失配情况下,入射高斯波横截面随传播距离增大而不断扩大,振幅随传播距离单调下降,而在强失配情况下,入射高斯波横截面明显出现先压缩后膨胀的现象,光波中心振幅则经历先下降后增大,再下降的过程。另一方面,晶体损耗不仅使得振幅失配的高斯光束演化成匹配的高斯光束,而且使得振幅及束腰均失配的高斯光束也演化成匹配的高斯光束。

参 考 文 献

[1] Segev M, Crosignani B, Yariv Y *et al.*. Spatial soliton in photorefractive media. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(7):

923~926
 [2] Duree G C, Shultz J J L, Salamo G J *et al.*. Observation of self-trapping of an optical beam due to the photorefractive effect. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(4): 533~536
 [3] Shih M F, Segev M, Valley G C *et al.*. Observation of two-dimensional photorefractive screening solitons. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10) 826~827
 [4] Chen Zhigang, Mitchell M, Shih M F *et al.*. Steady-state dark photorefractive screening solitons. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9) 629~631
 [5] Montemezzani C, Gunter P. Profile of photorefractive one-dimensional bright spatial solitons. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(7) 451~454
 [6] Segev M, Valley G C, Crosignani B *et al.*. Steady-state spatial screening solitons in photorefractive materials with external applied field. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(24): 3211~3214
 [7] Christodoulides D N, Carvalho M I. Bright, dark, and

- gray spatial soliton states in photorefractive media. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(9):1628~1633
- [8] Singh S R , Christodoulides D N. Evolution of spatial solitons in biased photorefractive media under steady state conditions. *Opt. Commun.* , 1995 , **118**(5/6) 569 ~ 576
- [9] Valley G C , Segev M , Crosignani B *et al.* . Dark and bright photovoltaic spatial solitons. *Phys. Rev. (A)* , 1994 , **50**(6) :R4457 ~ R4460
- [10] Morin M , Duree G , Salamo G *et al.* . Waveguides formed by quasi-steady-state photorefractive spatial solitons. *Opt. Lett.* , 1995 , **20**(20) 2066 ~ 2068
- [11] 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
- [12] Zhang Duying , Liu Jinsong , Liang Changhong. Solitary evolution of Gauss beam in photovoltaic-photorefractive crystal. *Acta Optica Sinica*(光学学报) , 2001 , **21**(6) : 647 ~ 651(in Chinese)

The Effect of Loss on Solitary Evolution of a Gauss beam in Photovoltaic-Photorefractive Crystal

Zhang Duying Liu Jinsong Liang Changhong

(Department of Applied Physics , Xidian University , Xi'an 710071)

(Received 23 August 2000 ; revised 20 November 2000)

Abstract : The effect of loss in the photovoltaic-photorefractive crystal on the solitary evolution of a Gaussian beam is investigated. It indicates that , for a given photovoltaic-photorefractive crystal and a proper Gaussian beam , the loss will give rise to the continuous change in amplitude and cross-section during the transmission of the incident Gaussian beam , and for long-distance transmission it will eventually lead to the divergence of the incident waves. For the strong mismatch case , the cross-section of Gaussian beam first compresses and then expands , while the amplitude at the beam center first decreases , then increases and decreases again. In the case of weak mismatch , the intensity and the cross-section will monotonically decrease. It is found that the loss in the crystal can make a mismatched incident Gaussian beam evolve to a matched one , and then become to a steady-state bright soliton.

Key words : Gaussian beam ; photorefractive effect ; spatial soliton