

串联光折变晶体回路中的独立空间孤子对^{*}

刘劲松

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 430074 武汉)

提要 研究了串联光折变晶体回路中空间孤子的属性问题。在暗-暗孤子对中, 可以存在屏蔽和屏蔽光伏暗孤子; 在明-明孤子对中, 只能形成光伏明孤子; 在明-暗孤子对中, 可以存在屏蔽光伏和光伏明孤子以及屏蔽光伏暗孤子。

关键词 空间光孤子, 光折变效应, 孤子对

中图分类号 O437.5 **文献标识码** A

Separate Spatial-soliton Pairs in a Series Photorefractive Crystal Circuit

LIU Jin-song

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The attribute of spatial soliton in a series photorefractive crystal circuit has been investigated. There are screening and screening-photovoltaic dark solitons in the dark-dark soliton pair; there are only the photovoltaic bright solitons in bright-bright soliton pair; and there are screening-photovoltaic and photovoltaic bright solitons and screening-photovoltaic dark solitons in dark-dark soliton pair.

Key words spatial optical solitons, photorefractive effects, soliton pairs

近十年来,人们对光折变空间光孤子的研究表现出了极大的兴趣。开展了对准稳态孤子、屏蔽孤子、光伏孤子以及屏蔽光伏孤子的研究。与此同时,研究了孤子对、孤子碰撞、孤子的相干与非相干耦合等问题。文献[1]对此作了详尽的综述。迄今为止,人们都是在一块晶体中研究光折变空间光孤子、孤子对以及孤子族的形成、演化、偏转和孤子相互作用,从未涉及两块串联光折变晶体回路中的相应问题。我们可以这样来设想这个问题:屏蔽孤子形成于加偏压的光折变晶体回路中,如果用另一块受光照的光伏光折变晶体作为电流源替换掉回路中的电压源,那么在这块光折变晶体中还能形成屏蔽孤子吗?再进一步,如果照射到这块光伏光折变晶体上的光束是一束合适的激光,那么这块晶体在作为电流源的同时,这束激光能否在其中演化成稳定的空间孤子,这种孤子是光伏孤子还是屏蔽光伏孤子?更进一步,如果两块晶体都是光伏光折变晶体,在这

两块晶体中能形成怎样的空间光孤子?我们已经对此问题做了研究^[2],在一维情况下证明了在这种串联光折变回路中,每块晶体内都能各自形成一种稳态光折变空间孤子,并称这两个孤子为独立空间孤子对,共有明-明、明-暗和暗-暗三种类型。在这个孤子对的两个孤子之间可以发生相互作用。当入射光束的空间展宽远小于晶体尺度时,暗孤子可以影响到另一个孤子,明孤子则不能。作为文献[2]工作的继续,本文着重讨论串联晶体回路中所形成的空间孤子的属性问题。

如图 1 所示,串联光折变晶体回路由两块光折变或光伏光折变晶体通过电极引线串联而组成。图中(a)为两个晶体的 C 轴都为右手螺旋方向,用 $\uparrow\uparrow$ 表示; (b)为一个晶体的 C 轴为右手螺旋方向,另一个晶体的 C 轴为左手螺旋方向,用 $\uparrow\downarrow$ 表示。P 和 P' 分别表示两块晶体, C 和 C' 表示晶体 C 轴, I_0 和 I'_0 表示一维明(暗)类孤子激光束。电极镀在法线与晶体 C 轴相平行的晶体表面。两块晶体中,至少有一块是光伏光折变晶体。两束 x 方向极化,并只

* 国家自然科学基金(10174025)

在 x 方向(与 C 轴相平行)衍射的一维类孤子激光束 I_0 和 \hat{I}_0 分别入射到两块晶体上,并沿 z 方向在晶体中传播。

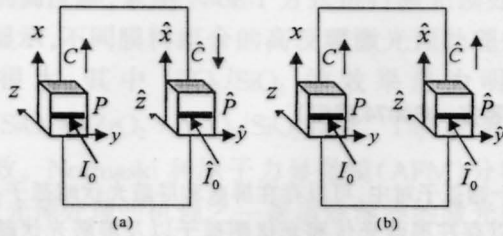


图 1 串联光折变晶体回路结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the serial photorefractive crystal circuit

设晶体 $P(\hat{P})$ 的电极间距和面积分别为 $W(\hat{W})$ 和 $S(\hat{S})$ 。采用与文献[3]相同的表示方法,以晶体 P 为例,令

$$\xi = \frac{z}{kx_0^2}, \quad s = \frac{x}{x_0}, \quad I(s, \xi) = |U(s, \xi)|^2 I_d$$

其中, x_0 为一个任意的空间宽度,

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

λ_0 是光波在自由空间的波长, n_e 是晶体非常光折射率, $I = I(x, z) = I(s, \xi)$ 是晶体内部光波的光强。对明孤子,

$$U(s, \xi) = r^{1/2} y(s) \exp(i\nu\xi), \\ r = I(0, 0)/I_d > 0,$$

I_d 是暗辐射光强;对暗孤子,

$$U(s, \xi) = \rho^{1/2} y(s) \exp(i\nu\xi), \\ \rho = I_\infty/I_d, \quad I_\infty = I(x \rightarrow \pm \infty, z)$$

其中, $y(s)$ 为孤子的归一化场包络, $0 \leq y(s) \leq 1$, ν 表示光波传播常数的空间移动。在下面的讨论中,将要用到关系式

$$\sigma = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33}/2)$$

其中, r_{33} 是电光系数; $E_p = k_p \gamma_R / (e\mu)$, 其中, k_p 是光伏常数, γ_R 是载流子复合速率, μ 是电子迁移率, e 是基本电荷, N_A 是施主密度;

$$\delta = S\mu s_i (N_D - N_A) / (r_R N_A W),$$

其中, s_i 是光电离截面, N_D 是未电离受主密度。晶体 \hat{P} 的相应结果可在各变量上加符号而得到。

利用串联电路的电压和电流的基本关系,采用我们在文献[3]中证明屏蔽光伏孤子的存在所用的方法,忽略扩散项的影响,在光束的空间展宽 Δx ($\Delta \hat{x}$) 远远小于晶体在 x (\hat{x}) 方向的宽度 W (\hat{W}) 的条件下,即 $\Delta x \ll W$ ($\Delta \hat{x} \ll \hat{W}$),推导出了晶体中

的空间电荷场 E_{sc} 和 \hat{E}_{sc} ,证明了在这种光折变回路中的每块晶体中存在着稳定(暗)的空间光孤子。 E_{sc} 和 \hat{E}_{sc} 为

$$E_{sc} = \frac{E_0(I_\infty + I_d) + E_p(I_\infty - I)}{I + I_d} \quad (1)$$

$$\hat{E}_{sc} = \frac{\hat{E}_0(\hat{I}_\infty + \hat{I}_d) + \hat{E}_p(\hat{I}_\infty - \hat{I})}{\hat{I} + \hat{I}_d} \quad (2)$$

E_0 和 \hat{E}_0 将在下面的讨论中予以解释。当一块晶体中形成明孤子,另一块晶体中形成暗孤子时,我们就称在光折变串联回路中形成了明-暗空间孤子对。设明孤子形成于晶体 P 内,其归一化场包络 $y(s)$ 满足如下方程

$$\frac{dy(s)}{ds} = \left(\frac{2G}{r}\right)^{1/2} [\ln(1 + ry^2) - y^2 \ln(1 + r)]^{1/2} \quad (3)$$

同时 ν 满足 $\nu - (\sigma E_p) \ln(1 + r)$ 。其中,对结构 $\uparrow\uparrow$,

$$G = \sigma(g\hat{E}_p + E_p),$$

对结构 $\uparrow\downarrow$,

$$G = \sigma(-g\hat{E}_p + E_p),$$

$$g = \delta I_\infty \hat{W}\Phi/W,$$

$$\Phi = 1/[\delta(I_\infty + I_d) + \delta(\hat{I}_\infty + \hat{I}_d)]$$

设暗孤子形成于晶体 \hat{P} 内,其归一化场包络 $\hat{y}(\hat{s})$ 满足如下方程

$$\frac{d\hat{y}(\hat{s})}{d\hat{s}} = (-2\hat{G})^{1/2} \left[(\hat{y}^2 - 1) - \frac{\hat{\rho} + 1}{\hat{\rho}} \ln\left(\frac{1 + \hat{\rho}\hat{y}^2}{1 + \hat{\rho}}\right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

同时 ν 满足 $\nu = -\hat{G}$ 。其中,对结构 $\uparrow\uparrow$,

$$\hat{G} = \sigma(1 - \hat{r})\hat{E}_p,$$

对结构 $\uparrow\downarrow$,

$$\hat{G} = \sigma(1 - \hat{r})\hat{E}_p,$$

$$g = \delta I_\infty W\Phi/\hat{W},$$

$$\hat{r} = \delta \hat{I}_\infty \Phi$$

方程(1)和(2)同时满足的条件是 $G > 0$ 和 $\hat{G} < 0$,这就是串联光折变回路中存在独立空间明-暗孤子对的条件。由此条件出发,可以得到形成明-暗孤子的四种方式^[2]。采用类似的方法可以得到形成暗-暗孤子对有六种方式,而形成明-明孤子对只有一种方式^[2]。

以晶体 P 为例,方程(1)表明, E_0 来自于晶体 \hat{P} 所施加的外电场。所以,当 $|E_p| \neq 0$ 时,尽管晶体 P 是光伏光折变晶体且在回路中无外加电场,在其中也可能形成屏蔽光伏孤子,而不一定必然是光伏孤子。对暗-暗孤子对,在结构 $\uparrow\uparrow$ 中,

$$E_0 = g\hat{E}_p - \Gamma E_p, \quad \hat{E}_0 = gE_p - \hat{\Gamma}\hat{E}_p$$

在结构 $\uparrow\downarrow$ 中,

$$E_0 = -g\hat{E}_p - \Gamma E_p, \quad \hat{E}_0 = -gE_p - \hat{\Gamma}\hat{E}_p$$

由此可判断出,以晶体 P 为例,当 $|E_p| \neq 0$ 时,无论 \hat{E}_p 是否为零,在其中形成的都是屏蔽光伏暗孤子,而不是光伏暗孤子;由于 E_p 和 \hat{E}_p 不能同时为零,当 $|E_p| = 0$ 时, \hat{E}_p 不能为零,此时在晶体 P 中只能形成屏蔽孤子。对明-明孤子对,在结构 $\uparrow\uparrow$ 和 $\uparrow\downarrow$ 中,都有 $E_0 = \hat{E}_0 = 0$,所以在两块晶体中形成的明孤子都只能是光伏明孤子。对明-暗孤子对,在结构 $\uparrow\uparrow$ 中,

$$E_0 = g\hat{E}_p, \quad \hat{E}_0 = -\hat{\Gamma}\hat{E}_p$$

在结构 $\uparrow\downarrow$ 中,

$$E_0 = -g\hat{E}_p, \quad \hat{E}_0 = -\hat{\Gamma}\hat{E}_p$$

所以,在晶体 P 中,当 $|E_p| \neq 0$ 时,若 \hat{E}_p 不为零,在其中形成的是屏蔽光伏明孤子;若 \hat{E}_p 为零,则在其中形成的是光伏明孤子。在晶体 \hat{P} 中,无论 E_p 是否为零,都要求 $\hat{E}_p < 0$,且在其中只能形成屏蔽光伏暗孤子。

参 考 文 献

- 1 候春风,李师群,李 斌等. 光折变介质中的空间孤子. 物理学进展,2001, 21:237~245
- 2 Liu Jinsong. Evolution of separate screening soliton pairs in a biased series photorefractive crystal circuit. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, to be published
- 3 Liu Jinsong, Lu Keqing. Screening-photovoltaic spatial solitons in biased photovoltaic photorefractive crystals and their self-deflection. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, 16:550~555