

# LiNbO<sub>3</sub> 晶体中光伏亮孤子实验研究<sup>\*</sup>

康轶凡<sup>1)†</sup> 卢克清<sup>2)</sup> 忽满利<sup>1)</sup> 康晓辉<sup>3)</sup> 张美志<sup>2)</sup> 王超<sup>4)</sup> 周利斌<sup>1)</sup> 陈幸<sup>1)</sup>

1) 西北大学物理系, 西安 710069)

2) 中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

3) 西安电子科技大学计算机学院, 西安 710071)

4) 西安交通大学电子科学与技术系, 西安 710049)

(2007 年 8 月 17 日收到, 2007 年 10 月 17 日收到修改稿)

从理论上分析了具有不同 Glass 常数的背景光在晶体折射率空间分布相对变化中的作用, 得到了折射率改变为负的晶体中形成亮、暗光伏孤子的条件. 以此为基础, 用 532 nm 的 e 光作信号光、488 nm 的 o 光作背景光并不断变化背景光和信号光的功率, 首次在实验上观察到了 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中亮光伏孤子的形成.

关键词: 亮光伏孤子, 自散焦, 自聚焦, 光生伏打效应

PACC: 4265S, 4265J

## 1. 引 言

自从有人提出利用光折变非线性补偿光在传播中的衍射效应从而产生了光折变空间孤子以来, 对光折变空间孤子研究引起了人们极大的兴趣. 作为三种基本类型光折变空间孤子(准稳态孤子<sup>[1]</sup>、屏蔽孤子<sup>[2]</sup>、光生伏打孤子<sup>[3-7]</sup>)之一的光伏孤子, 其形成不需要外加电场, 只要求所用的光折变晶体有足够强的光伏效应. 根据光折变效应的理论<sup>[3,4]</sup>, 在折射率改变为负的光伏晶体中, 则应该形成暗光伏孤子, 反之, 应形成亮光伏孤子. 实验已证明在折射率改变为负的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中观察到暗光伏孤子<sup>[5,6]</sup>, 在折射率改变为正的 KNSBN:Cu 晶体中观察到二维的亮光伏孤子<sup>[7]</sup>. 当然, 也有通过改变实验条件, 如外加电压并同时入射一束同波长的背景光而在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中形成屏蔽光伏亮孤子<sup>[8,9]</sup>的情况. Anastassiou 等人<sup>[10]</sup>从理论上证明了对光伏孤子而言, 背景光的光伏效应不可忽略. 在具有合适 Glass 常数背景光的作用下, 折射率改变为负的光伏晶体中将会出现自散焦向自聚焦转换的现象, 而这恰是导致亮光伏孤子形成的必要条件. 但通过加背景光而在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中形成亮光伏孤子的实验至今并

未报道.

本文从理论上分析了加不同 Glass 常数的背景光时, 折射率改变为负的光伏晶体其折射率扰动空间分布的变化情况, 得出了在此晶体中形成暗、亮光伏孤子的条件. 实验上, 当用 532 nm 的 e 光作信号光、o 光作背景光时, 在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中观察到了高斯光束从自散焦向自聚焦转换的现象; 而当改用 488 nm 的 o 光作为背景光并不断变化背景光和信号光的功率, 观察到 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中亮光伏孤子的形成. 另外, 根据本文的实验结果推测, 在一定的功率之比范围内, 较大的光功率将加快亮光伏孤形成的速度, 但并不影响其最终形成这一事实.

## 2. 理论分析

在光致折射率改变的光伏晶体中, 除了信号光外, 为了加快孤子的形成速度, 一般都加上一束均匀背景光. 信号光为 e 光, 背景光为均匀 o 光. 下面的分析考虑背景光的作用. 理论分析从描述光折变的速率方程、电流方程和空间电荷场的泊松方程出发, 忽略扩散效应<sup>[3]</sup>.

$$(I_s S_s + I_b S_b + \beta)(N_d - N_d^i) - \gamma n N_d^i = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot [q\mu n \mathbf{E} + (\kappa_{\text{eff}}^e I_s S_s + \kappa_{\text{eff}}^o I_b S_b)]$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:30674176)和西北大学研究生创新教育项目(批准号:07YJC01)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yifan440@126.com

$$\times (N_d - N_d^i)], \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} + (q/\epsilon_s)(\mathbf{n} + N_A - N_d^i) = 0, \quad (3)$$

其中,  $\kappa_{\text{eff}}^e$  和  $\kappa_{\text{eff}}^o$  分别为晶体对信号光和背景光的有效 Glass 常数;  $I_s, I_b$  为信号光和背景光的光强;  $S_s, S_b$  为晶体对这两种光的吸收截面;  $n$  为电子数密度;  $N_d$  为总的施主密度;  $N_d^i$  为已电离的施主密度;  $N_A$  为补偿已电离的电荷受主密度;  $\beta$  为暗辐射率;  $\gamma$  为复合率系数;  $J$  为电流密度;  $E$  为空间电荷场;  $\mu$  为电子迁移率;  $\epsilon_s$  为低频介电常数;  $-q$  为电子电量. 下面我们对方程转化成无量纲的形式. 设  $a' = I_b S_b / \gamma N_A, u^2(\xi) = I_s S_s(\xi) / I_b S_b, R = \kappa_{\text{eff}}^o / \kappa_{\text{eff}}^e$ . 其他未及的物理量与文献 [4] 相同. 由于暗辐射相对于背景光而言很小, 则  $\beta \approx I_b S_b$ . 经一系列推导, 得到空间电荷场为

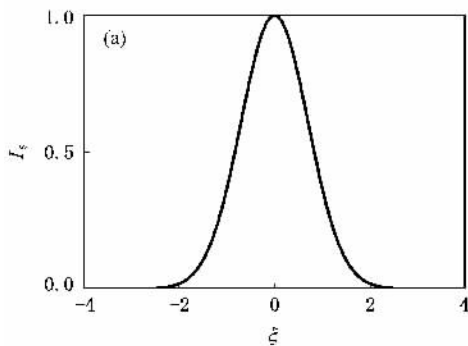
$$E = \frac{J - [R + u^2(\xi)]}{1 + u^2(\xi)}, \quad (4)$$

对开路情况  $J = 0$  (4) 式可简化为

$$E = -\frac{R + u^2(\xi)}{1 + u^2(\xi)}, \quad (5)$$

把  $E = \frac{E}{E_p}$  代入方程 (5) 得

$$\frac{E}{E_p} = -\frac{R + u^2(\xi)}{1 + u^2(\xi)} = -\left[1 + \frac{R - 1}{1 + u^2(\xi)}\right], \quad (6)$$



特别注意的是 (6) 式中右边的负号表征的是空间电荷场  $E$  与  $E_p$  的相对方向, 其空间的变化规律可表示为

$$E \propto \frac{R - 1}{1 + u^2(\xi)}, \quad (7)$$

下面通过 (7) 式分析在加不同背景光的情况下, 折射率改变为负的晶体中其折射率扰动空间分布的变化情况:

1) 信号光  $I_s(\xi)$  为一高斯光束, 也即  $u^2(\xi)$  满足高斯分布. 因  $\Delta n \propto -E$ , 则晶体折射率  $n = n_0 + \Delta n$  与  $\Delta n$  满足同样的空间变化规律. 那么对于  $R > 1$  和  $R < 1$  两种条件下空间折射率的相对分布可由 (7) 式得出 (这里取正比例系数为 1).  $R > 1, R < 1$  的分布曲线如图 1 所示. 这里特意画出了没加背景光 ( $R = 0$ ) 的曲线以作比较. 图 1 中,  $u^2(\xi) = \exp(-\xi^2)$ . 由图可知, 在  $R < 1$  的情况下, 晶体的折射率空间分布相对  $R = 0$  发生了变化, 但总的空间变化趋势并没有改变; 在  $R > 1$  的条件下, 空间折射率相对分布相对于  $R = 0$  发生了明显的变化, 导致晶体由原来的自散焦特性转化为自聚焦特性. 而这恰是形成亮光伏孤子的必要条件.

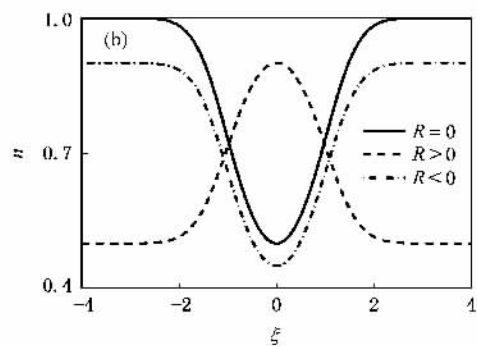


图 1 (a) 高斯光束光强轮廓图 (b)  $R=0; R>1; R<1$  情况下, 晶体折射率分布曲线图

2) 信号光  $I_s(\xi)$  为一带有暗迹的高斯光束, 光束空间分布取满足其条件的形式之一:  $u^2(\xi) = 1/(1 + \exp(-\xi^2))$ . 相应的  $R > 1, R < 1$  的分布曲线亦可画出, 在此略去. 类似的分析可以得出  $R < 1$  是形成暗光伏孤子的必要条件.

### 3. 实验结果及分析

为了观察由不同 Glass 常数的背景光的引入所

引起晶体折射率分布的变化情况, 我们做了如下的实验. 实验中所用的晶体是折射率改变为负的  $\text{LiNbO}_3$  晶体, 其尺寸为  $10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ , 通光厚度为  $8 \text{ mm}$ .

#### 3.1. 自散焦向自聚焦转换实验

信号光和背景光皆来自一  $\text{Ar}^+$  离子激光器, 波长为  $488 \text{ nm}$ . 取信号光为 e 光, 背景光为 o 光, 则晶体的两个有效 Glass 常数之比约为  $1^{[11]}$ . 实验装置

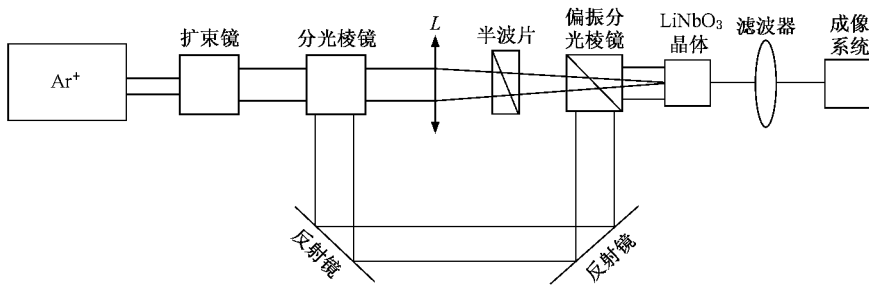


图 2 自散焦向自聚焦转换的实验装置图

如图 2 所示, 实验中  $\text{Ar}^+$  激光器输出的 488 nm 蓝光 是平行于台面振动的线偏振光, 它经一扩束镜后成 为一被扩展的平行光束, 接着用一分光棱镜将其分 束, 其中一束经焦距为 20 cm 的柱面镜  $L$  压缩成一 维光束, 聚焦后入射到晶体上, 成为信号光。另一束 光经两个高反射镜反射后, 入射到偏振分光棱镜上 和信号光共线传输成为背景光。信号光经过透镜 后, 在辐照晶体之前还要经过一半波片和一偏振分 光棱镜。该半波片的作用是将平行于台面振动的线 偏光变成基本垂直于台面振动的线偏光, 该偏振分 光棱镜进一步确保信号光为垂直于台面振动线偏振 光, 背景光为一平行于台面振动的线偏振光。背景 光在晶体入射面处的直径大约为 5 mm, 远大于信号 光的宽度。这样相对于信号光而言, 背景光可近似

看成是均匀的。晶体后加滤波器的目的是为了滤掉 背景光, 便于在成像系统中观察信号光的变化。成 像系统由放大倍率为 4 倍的显微物镜和电荷耦合器 件( charge coupled device, 简称 CCD) 组成。实验中, 晶体的光轴沿垂直于实验平台的方向, 这样信号光 相对于晶体来说是  $e$  光, 背景光为  $o$  光。

实验结果如图 3 所示。图 3(a) 为信号光在晶体 输入面和输出面的照片图, 图 3(b) 为相对应的光强 轮廓图。在晶体输入面处的半高宽为  $52.8 \mu\text{m}$ , 如图 3(b) 左边所示; 在不加背景光的情况下, 让信号光单 独通过晶体传输 8 mm 后, 也就是在晶体出射面处, 入射光衍射到  $265 \mu\text{m}$ , 如图 3(b) 中间所示; 当信号 光衍射到极大时, 打开背景光, 让其和信号光同时辐 照在  $\text{LiNbO}_3$  晶体上, 这时信号光逐渐缩小, 也就是

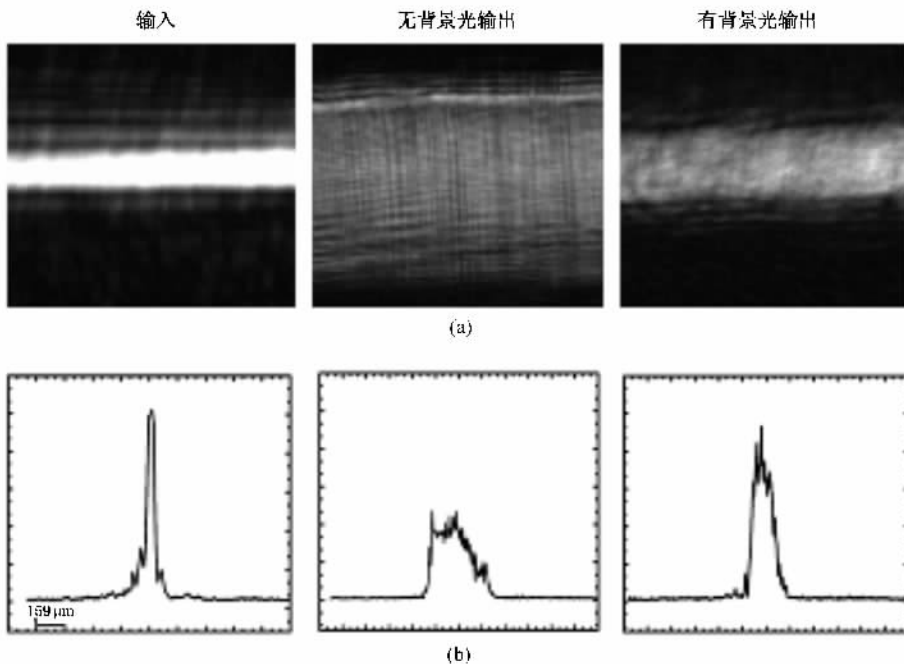


图 3  $\text{LiNbO}_3$  晶体中自散焦向自聚焦转换的实验结果图 (a) 为晶体输入面、输出面处信号光照片图; (b) 为其相对应的光束横截面光强分布曲线图

说晶体中开始出现由自散焦向自聚焦转换的物理过程,达到稳态时,晶体出射面处的半高宽为  $122 \mu\text{m}$ ,如图 3(b) 右边所示. 由于输出光没有自陷到最初的输入光尺寸,因而在此实验条件下没有观察到亮光伏孤子的形成. 此实验中,信号光功率为  $2 \text{ mW}$ ,背景光功率为  $90 \text{ mW}$ .

正如前文所言,通过改变实验条件,如信号光与背景光的相对功率之比,并没有在所述晶体中观察到亮光伏孤子的形成. 这说明折射率改变为负的光折变晶体中,当采用同一波长的光作为背景光和信号光时是很难形成亮光伏孤子的. 这与文献 [11] 所预言的相同. 根据上面的理论分析知,当同时引入一束 Glass 常数比  $R > 1$  的背景光时,空间折射率相

对分布的变化会导致晶体由原来的自散焦特性转化为自聚焦特性,而这将很有可能在其中形成亮光伏孤子.

### 3.2. 亮光伏孤子形成实验

实验装置如下图 4 所示. 其和第一个实验基本相同,所不同的是用  $532 \text{ nm}$  的 e 光作为信号光,  $488 \text{ nm}$  的 o 光作为背景光,晶体的两个有效 Glass 常数之比为  $1.2$ .  $532 \text{ nm}$  的绿光经  $L_1$  后成为平行光,再经焦距为  $20 \text{ cm}$  的圆柱透镜  $L_2$  聚焦入射到晶体上成为信号光.  $\text{LiNbO}_3$  晶体入射面处于透镜  $L_2$  焦点后约  $2 \text{ mm}$  处. 背景光相对于信号光而言是均匀的,它经偏振分光棱镜后和信号光共线传输辐照在晶体上.

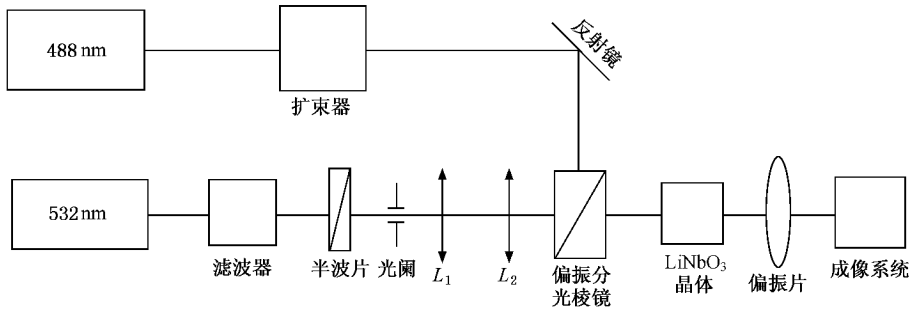


图 4 亮光伏孤子形成的实验装置图

实验结果如图 5 所示. 在晶体输入面处信号光的半高宽为  $29 \mu\text{m}$ (图 5(b) 左边),传输  $8 \text{ mm}$  后,无

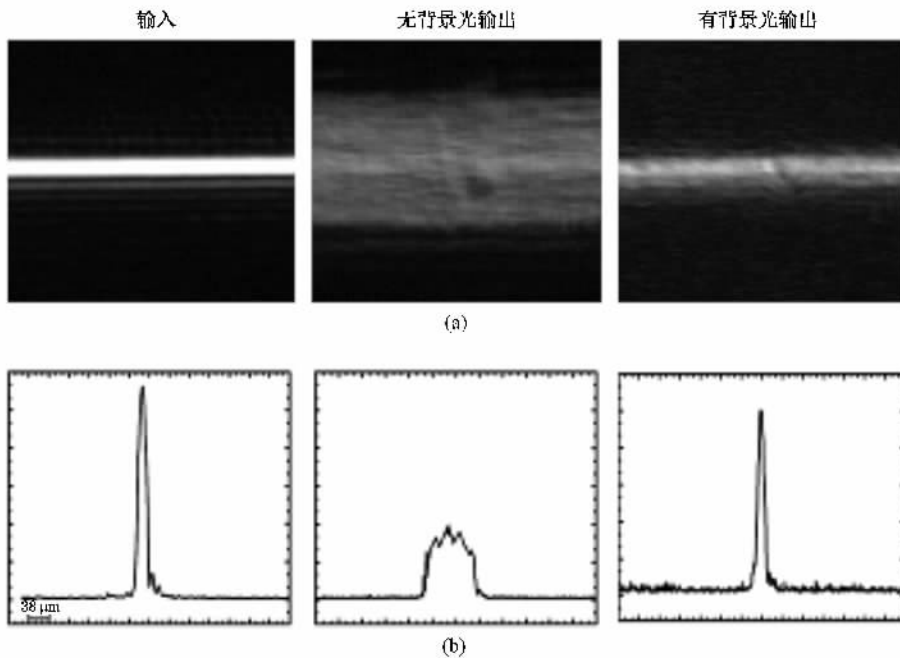


图 5  $\text{LiNbO}_3$  晶体中亮光伏孤子形成实验结果图 (a) 为晶体输入面、输出面处信号光照照片图;(b) 为其相对应的光束横截面光强分布曲线图

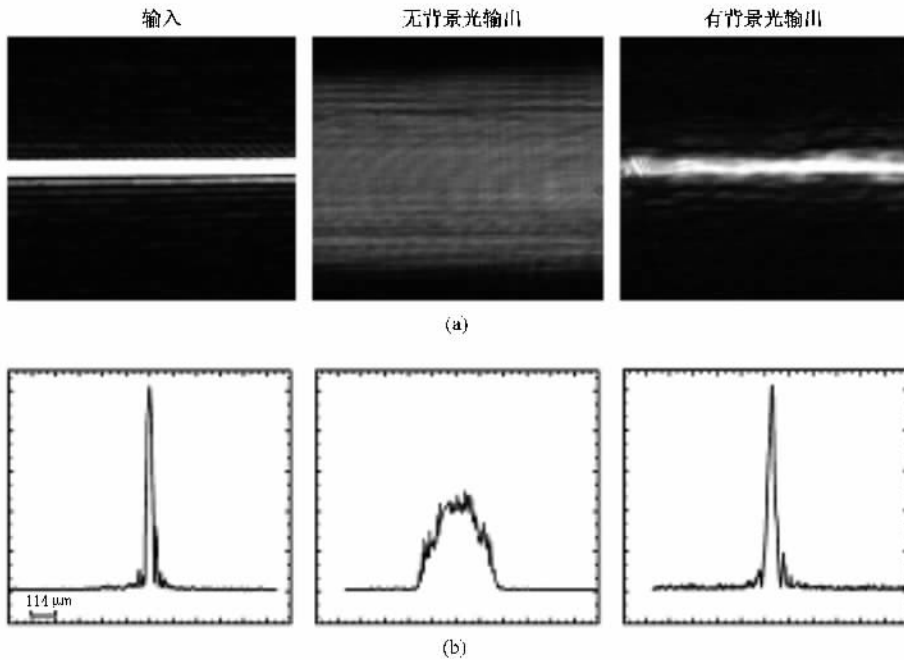


图6 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中亮光伏孤子形成实验结果图 (a)为晶体输入面、输出面处信号光照片图;(b)为其相对应的光束横截面光强分布曲线图

背景光时信号光由于衍射发散而在晶体出射面处的半高宽约为  $100 \mu\text{m}$  左右(图 5(b)中间),然后打开背景光,让背景光和信号光同时辐照晶体,晶体出射面处信号光开始缩小,在 10min 左右达到稳态并形成孤子,其半高宽为  $29 \mu\text{m}$ (图 5(b)右边)。此时信号光功率为  $39 \text{ mW}$ ,背景光功率为  $90 \mu\text{W}$ 。接着我们调整两光束的功率又做了几组实验,当信号光功率变为  $140 \text{ mW}$ 、背景光变为  $180 \mu\text{W}$  时,在 5 min 左右便可形成稳态的亮光伏孤子。其实验结果如图 6 所示。输入的信号光半高宽为  $38 \mu\text{m}$ (图 6(b)左边);衍射最大时的半高宽为  $276 \mu\text{m}$ (图 6(b)中间);打开背景光后孤子形成时的半高宽约为  $38 \mu\text{m}$ (图 6(b)右边)。

由上面实验结果图可看出,当所用背景光和信号光的 Glass 常数比大于 1 时,采用合适相对功率的信号光和背景光就可在折射率改变为负的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中形成亮光伏孤子。且我们有理由认为:在一定的功率之比范围内,较大的光功率将使亮光伏孤

形成的速度加快,但并不影响最终形成亮光伏孤子这一事实。

## 4. 结 论

本文从理论上分析了加不同 Glass 常数的背景光时,折射率改变为负的光伏晶体其折射率扰动空间分布的变化情况,得出了在此晶体中形成暗、亮光伏孤子的条件。实验上,当用  $532 \text{ nm}$  的 e 光作信号光, o 光作背景光时,在折射率改变为负的 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中观察到了其光折变特性从自散焦向自聚焦转换的现象,而当改用  $488 \text{ nm}$  的 o 光作为背景光以使背景光和信号光的 Glass 常数比大于 1 并不断改变两者的功率时,首次在实验上观察到了 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中亮光伏孤子的形成。另外,根据本文的实验结果我们认为,在一定的功率之比范围内,较大的光功率将加快亮光伏孤形成的速度,但并不影响其最终形成这一事实。

[1] Morin M, Duree G, Salamo G 1995 *Opt. Lett.* **20** 2066

[2] Shih M F, Leach P, Segev M, Ott M H, Salamo G, Valley G C 1996 *Opt. Lett.* **21** 324

[3] Valley G C, Segev M, Crosignani B, Yariv A, Fejer M M, Bashaw M C 1994 *Phys. Rev. A* **50** R4457 Liu J S, Zhang D Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 880 (in Chinese)

- [ 刘劲松、张都应 2001 物理学报 **50** 880 ]
- [ 4 ] Segev M , Valley G C , Bashaw M C , Taya M , Fejer M M 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 1772
- [ 5 ] Taya M , Bashaw M C , Fejer M M , Segev M , Valley G C 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3095  
Li J P , Lu K Q , Zhao W , Yang Y L , Zhu X P , Guo X H 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1423
- [ 6 ] Chen Z G , Segev M , Christodoulides D N , Feigelson R S 1999 *Opt. Lett.* **24** 1160
- [ 7 ] She W L , Lee K K , Lee W K 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 3182
- [ 8 ] Fazio E , Renzi F , Rinaldi R , Bertolotti M , Chauvet M , Ramadan W , Petris A , Vlad V I 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2193
- [ 9 ] Vlad V I , Petris A , Bosco A , Fazio E , Bertolotti M 2006 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **8** 477
- [ 10 ] Anastassiou C , Shih M F , Mitchell M , Chen Z G , Segev M 1998 *Opt. Lett.* **23** 924
- [ 11 ] She W L , Wang X S , He G G , Tao M X , Lin L P , Lee W K 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2166 ( in Chinese ) [ 余卫龙、王晓生、何国岗、陶孟仙、林励平、李荣基 2001 物理学报 **50** 2166 ]

## Experimental study of bright photovoltaic solitons in lithium niobate crystal<sup>\*</sup>

Kang Yi-Fan<sup>1,2,†</sup> Lu Ke-Qing<sup>2)</sup> Hu Man-Li<sup>1)</sup> Kang Xiao-Hui<sup>3)</sup> Zhang Mei-Zhi<sup>2)</sup> Wang Chao<sup>4)</sup>  
Zhou Li-Bin<sup>1)</sup> Chen Xing<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *Department of Physics , Northwest University , Xi 'an 710069 , China )*

<sup>2</sup> *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics , Xi 'an Institute of Optics and Precision Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Xi 'an 710119 , China )*

<sup>3</sup> *Department of Computer , Xidian University , Xi 'an 710071 , China )*

<sup>4</sup> *Department of Electronics Science and Technology , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China )*

( Received 17 August 2007 ; revised manuscript received 17 October 2007 )

### Abstract

The effect of background beam with different Glass constant on the relative spatial refractive perturbation in photovoltaic crystal was discussed , in which was introduced the concrete conditions for the formation of bright or dark photovoltaic spatial solitons in crystals with negative refractivity change. Based on the results , for what is to our knowledge the first time , the bright photovoltaic solitons was experimentally observed in  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  by use of e-ray signal of 532 nm and o-ray background illumination of 488 nm.

**Keywords :** bright photovoltaic soliton , self-defocusing , self-focusing , photovoltaic effect

**PACC :** 4265S , 4265J

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10674176 ) and the Postgraduate Innovation Cultivation Foundation of Northwest University , China ( Grant No.07YJC01 ).

<sup>†</sup> E-mail : yifan440@126.com