

# 完全非相干白光一维光生伏打暗空间孤子\*

陆 猗<sup>1)</sup> 刘思敏<sup>2)</sup> 郭 儒<sup>2)</sup> 杨立森<sup>3)</sup> 黄春福<sup>2)</sup> 汪大云<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 天津理工学院自动化系, 天津 300191)

<sup>2)</sup> 南开大学物理学院, 天津 300071)

<sup>3)</sup> 内蒙古师范大学物理系, 呼和浩特 010022)

(2003 年 2 月 17 日收到, 2003 年 3 月 26 日收到修改稿)

使用白炽灯作光源在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体内实验观察到一维白光光生伏打暗空间孤子. 由奇数和偶数初始条件分别产生了灰孤子和灰孤子对, 它们所感应的波导能导向白光和相干光. 用相干光清楚地探测到它们内部的多模结构. 该实验证明了白光光生伏打暗空间孤子的存在, 并指出了用完全非相干的白光暗孤子控制和导向相干光的可能性.

关键词: 光生伏打效应, 自陷, 完全非相干孤子, 波导

PACC: 4265S, 4280L

## 1. 引 言

自从 1992 年 Seggev 等<sup>[1]</sup>提出利用光折变非线性补偿光在传播中的衍射效应, 从而产生光折变空间孤子以来, 目前发现和研究的较多的光折变型空间孤子主要有三种基本类型: (1) 瞬态空间孤子<sup>[2]</sup>; (2) 屏蔽空间孤子和光生伏打空间孤子<sup>[3,4]</sup>; (3) 矢量空间孤子<sup>[5]</sup>. 其中屏蔽空间孤子和光生伏打空间孤子都是稳态的标量空间孤子, 它们包括亮空间孤子和暗空间孤子. 屏蔽空间孤子需要外加的直流电场和均匀的背景光, 它起源于对外加电场的非均匀屏蔽. 光生伏打空间孤子的形成不需要外加电场, 它是由光照射晶体时光生伏打效应产生的空间电荷场通过电光效应(Pockels 效应)引起晶体的折射率变化所致. 直到 1995 年, 这些光折变空间孤子的理论和实验研究都是用相干光进行的, 人们普遍认为孤子是相干的实体. 1996 年 Mitchell 等<sup>[6]</sup>首次证明了空间上相位随机变化的部分非相干光屏蔽亮空间孤子的存在, 随后又观察到完全非相干白光形成的屏蔽亮空间孤子<sup>[7]</sup>, 部分非相干光光生伏打亮空间孤子等<sup>[8]</sup>. 有关非相干光空间孤子的理论之一相干密度方法曾经预言了非相干光暗孤子的存在<sup>[9]</sup>. 此后

不久, 实验也证明了确实存在部分非相干光屏蔽型暗空间孤子<sup>[10,11]</sup>, 但是作者至今尚未见到用完全非相干白光在光折变非线性介质中形成暗空间孤子的报道. 本文使用普通白炽灯作光源, 由它发射出时间和空间上完全不相干的白光分别通过相位掩模和振幅掩模(奇数和偶数初始条件), 在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中分别形成了完全非相干白光一维光生伏打灰孤子和灰孤子对, 并感应出波导. 我们研究了这些暗空间孤子的形成条件、传播特性及其内部的多模结构等. 该实验证明了白光光生伏打暗空间孤子的存在, 由它们所感应的波导既能导向白光也能导向激光, 并指出了用完全非相干的白光暗孤子控制和导向相干光的可能性.

## 2. 实验及结果

在实验中我们用 220 V, 25 W 的普通白炽灯作光源(灯丝为扩展线光源), 它产生的完全非相干白光是具有相位统计分布的包含各种波长的混合光(自然光), 其可见光的波长范围在 380—750 nm, 平均波长为 550 nm, 波长宽度  $\Delta\lambda$  大于  $0.3 \mu\text{m}$ , 光束的相干长度  $L_c$  趋于零,  $L_c \approx 10^{-3} \text{ mm}$ (相干时间约为  $10^{-15} \text{ s}$ ).

\* 国家自然科学基金(批准号 60078013, 60278006)资助的课题.

## 2.1. 奇数初始条件

我们首先令白光经过准直透镜成为准平行光, 然后这束光通过一定厚度的相位掩模, 以确保在光场中心区域凡是满足  $\Delta\phi = 2\pi\delta(n-1)/\lambda_0 = (2K+1)\pi$  ( $\Delta\phi$  为通过与不通过相位掩模的两部分光的相位差,  $\lambda_0$  为光在真空中的波长,  $\delta$  和  $n$  分别为相位掩模的厚度和折射率,  $K=0, 1, 2, \dots$ ) 波长的光波有  $\pi$  相位的跃变(奇数初始条件). 载有暗迹的完全非相干白光沿着实验系统的光轴方向传播, 晶体的  $c$  轴垂直于光的传播方向. 该光束再经另一透镜聚焦后, 将相位掩模成像在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体(尺寸  $1.0 \times 1.2 \times 1.4 \text{ cm}^3$  掺 Fe 0.03 wt%) 的输入面上, 入射光的平均强度约为  $67 \text{ mW/cm}^2$ . 晶体的输出面再经过第三个透镜和衰减器成像在 CCD 上. 我们通过改变相位掩模与聚焦透镜之间的距离改变掩模的成像位置(晶体输入面的位置), 可以改变入射光在晶体输入面上的光斑尺寸, 从而改变入射光的平均光强与暗辐照的比值来控制晶体非线性  $\Delta n$  ( $\Delta n < 0$ ) 的大小. 我们发现, 晶体位置只有在聚焦透镜焦点后的小范围内才能够满足暗光束自陷的条件. 由相位掩模产生一维完全非相干白光暗空间孤子的典

型实验结果如图 1 所示. 在晶体的输入面上, 暗迹的几何宽度为  $48 \mu\text{m}$  (图 1(a)); 在时间  $t=0$  时(没有非线性)暗迹在晶体内传播  $1.0 \text{ cm}$  后衍射至  $130 \mu\text{m}$  (图 1(b));  $t=0$  时用白光读出的输出光束(图 1(c)) 辐照约 2 h 后晶体输出面上的暗迹宽度约为  $85 \mu\text{m}$  (图 1(d)). 图 1(e) 和 (f) 显示移去相位掩模后, 用实验白光和另一功率约为  $1 \text{ mW}$  扩束并准直的 He-Ne 激光( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 非偏振光)作为探测光分别读出的输出光束, 由它们的宽度可以看出此时白光产生的非线性还没有完全抵消暗光束的衍射, 波导的边界也不太清楚; 图 1(g) 显示辐照 5 h 后写入过程自陷的输出光束, 暗迹的宽度约为  $50 \mu\text{m}$  说明它已形成了暗孤子; 图 1(h) 和 (i) 分别表示此刻用白光和激光读出的输出光束, 显然, 该孤子的感应波导能很好地导向探测的白光和激光.

## 2.2. 偶数初始条件

我们用金属丝作为振幅掩模(偶数初始条件), 除了金属丝的成像位置离聚焦透镜的焦点更近, 晶体输入面上入射光的平均光强增至  $88 \text{ mW/cm}^2$  之外, 其他实验条件同相位掩模的情况. 典型的实验结果如图 2 所示. 在晶体的输入面上暗迹的宽度约为  $60 \mu\text{m}$  (图 2(a)); 在时间  $t=0$  时(没有非线性)暗

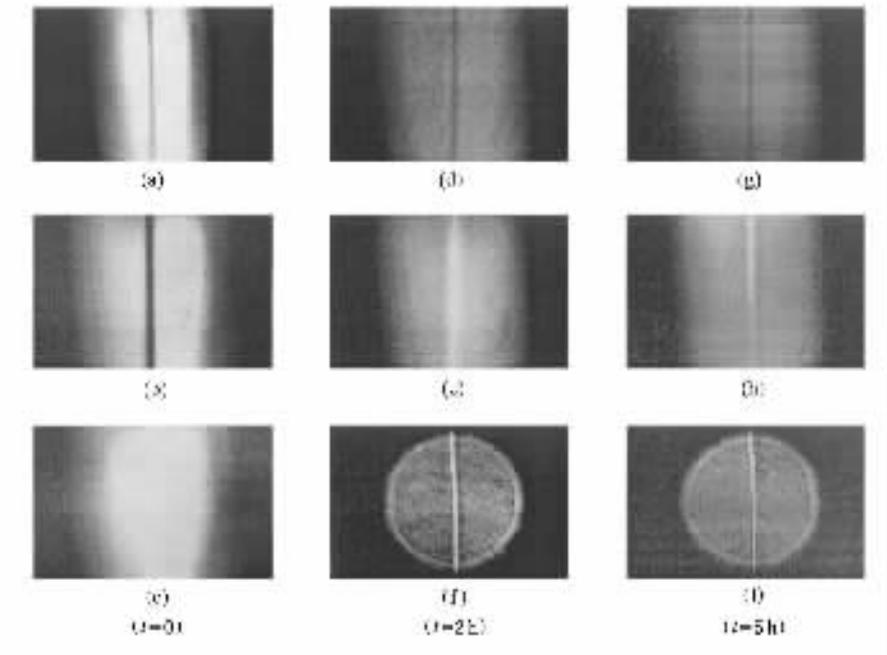


图 1 由相位掩模产生的一维非相干白光光生伏打暗空间孤子及其感应波导 (a) 输入光束, (b)  $t=0$  时衍射的输出光束 (c)  $t=0$  时用白光读出的光束 (d) 辐照 2 h 后的输出光束 (e) 和 (f) 分别为辐照 2 h 后用白光和激光读出的输出光束 (g) 辐照 5 h 后自陷的输出光束 (h) 和 (i) 分别表示辐照 5 h 后孤子感应波导向探测的白光与激光

迹在晶体内传播  $1.0\text{ cm}$  后衍射至  $180\ \mu\text{m}$ (图 2(b)); 在  $t=0$  移去掩模后用白光读出的输出光束如图 2(c)所示;图 2(d)–(h)的第一行显示写入过程晶体输出面上光束随时间的演化过程,第二行和第三行分别显示用白光和激光作为探测光读出的输出光束演化过程.从照片可以清楚地看出,在我们的实验条件下 Y 结的形成过程:在形成孤子的光束照射晶体的初始阶段(5 h 内),在晶体输出面上始终只看到一条暗迹,图 2(d)第一行显示辐照 3 h 后的输出光

束,这一点同部分非相干 Y 结灰孤子的情况<sup>[11,12]</sup>.辐照 3 h 后用白光和激光读出的输出光束如图 2(d)的第二、第三行所示.此后,写入过程中晶体输出面的一条暗迹逐渐变粗和变模糊,5 h 后开始分裂为两条暗迹——Y 结,辐照 7 h 后输出光束如图 2(e)第一行所示,每条暗迹的宽度为  $120\ \mu\text{m}$ ,暗迹之间的距离约为  $100\ \mu\text{m}$ .随着辐照时间的延长两条暗迹变得越来越清楚,并且在相当长的时间内暗迹的宽度以及暗迹之间的距离均保持不变(图 2(f)–(h)第一

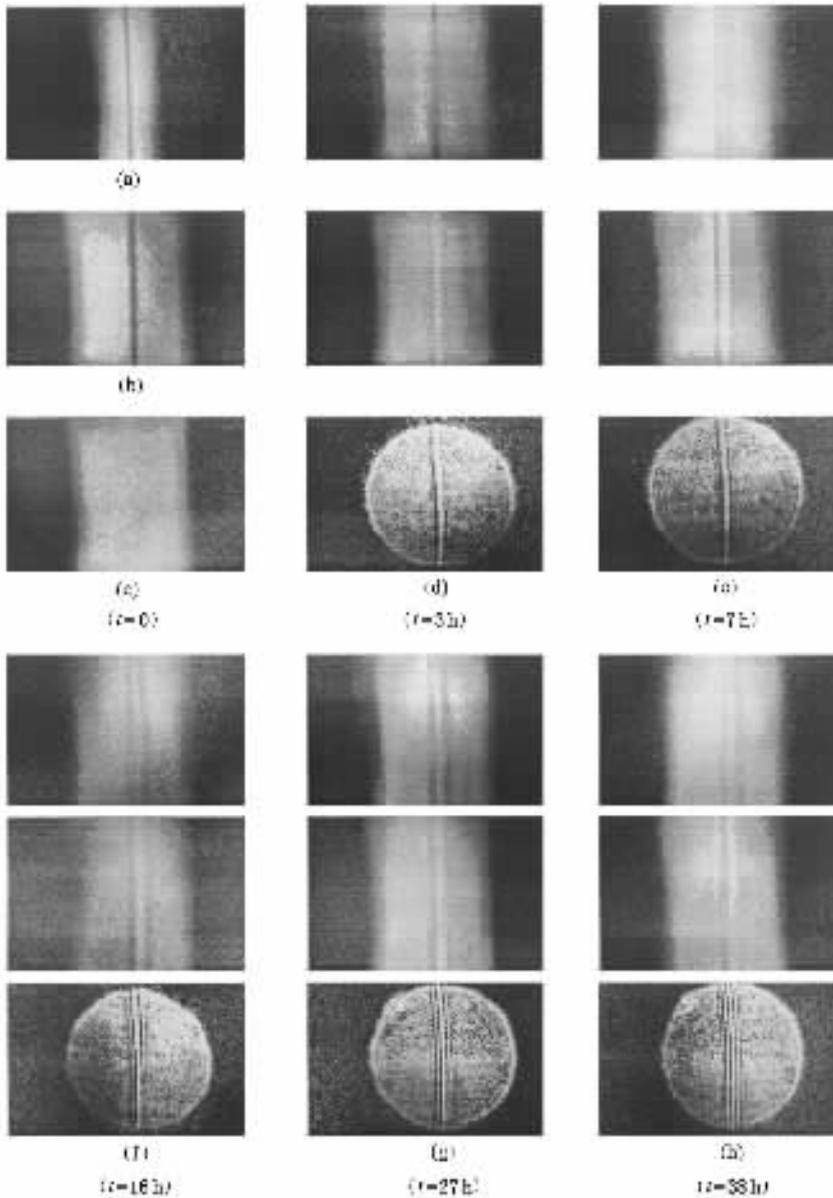


图 2 由振幅掩模产生的一维非相干白光光生伏打暗空间孤子对 (a)输入光束 (b) $t=0$  时衍射的输出光束 (c) $t=0$  用白光读出的输出光束 (d)–(h)第一行显示写入过程中输出光束随时间的演化过程,第二行、第三行分别显示用白光和激光作为探测光读出的输出光束随时间的演化过程

行)在同一时刻写入过程的输出光束与读出过程的输出光束逐渐趋于一致(图 2(d)–(h)第一行和第二行),没有观察到强度的反转,只是记忆下晶体输出面上初始的相位与强度分布,图 2(d)–(h)第三行表示移去掩模后用激光作为探测光,孤子内部的微细结构随时间逐渐显现的过程,达到稳定后中央亮区内有一条细黑线(图 2(h)第二行),两侧的两条暗迹内部还各有两条细亮线(图 2(h)的第三行),辐照时间超过 38 h 后得到的对应照片都与图 2(h)相同,这显示灰孤子对已达到稳定状态。

图 3 是另一次实验结果.与图 2 的实验唯一不同的是晶体的输入面更靠近聚焦透镜的焦点,入射光的平均光强大约为  $98 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .图 3(a)表示输入光束,暗迹的宽度为  $30 \mu\text{m}$ ;图 3(b)表示在时间  $t = 0$  时暗迹在晶体内传播  $1.0 \text{ cm}$  后衍射至  $120 \mu\text{m}$ ;图 3(c)和(d)分别为辐照 5 h 写入和读出的输出光束;图 3(e)和(f)分别为辐照 11 h 后写入和读出的输出光束,此时已经明显看到强度的反转,而且写入和读出的两张照片很相似,这是因为一旦晶体内形成波导后,写入过程中孤子形成光束也会在波导内自导向.图 3 清楚地说明,对于偶数初始条件形成的完全非相干灰孤子对,如果初始时暗迹与白光的对比度比较大,由入射光的平均强度与暗辐照的比值所决定的非线性合适,则它们也能感应出波导,但是波导导向白光的性能不如相位掩模的情况好。

### 2.3. “位移”现象的观察

我们在上述的实验中都观察到完全非相干白光光生伏打暗空间孤子在辐照的初始阶段沿晶体  $c$

轴方向缓慢移动的“位移”现象.在相位掩模的情况下单个孤子沿晶体  $c$  轴方向移动大约  $25 \mu\text{m}$ ,在振幅掩模的情况下,灰孤子对移动大约  $70 \mu\text{m}$ .当把晶体旋转  $180^\circ$  放置时,类黑孤子和灰孤子对的移动方向都与原来的移动方向相反.但是辐照约 2 h 左右这种位移现象就停止了,最终孤子的形状及结构均达到稳定状态。

## 3. 讨 论

### 3.1. 完全非相干白光暗空间孤子的形成条件

为了使完全非相干白光中的一维暗迹或二维暗“洞”自陷,必须满足以下条件:首先,非线性介质的响应时间必须比光束相位涨落的时间长得多,这类介质的非线性是对光束的时间平均包络响应,而不是对组成非相干光束的瞬时“散斑”响应,从而使形成孤子光束在这类非瞬时非线性介质中感应的波导能够导向速变的光束使之达到自陷,即完全非相干(暗/亮)光束的自陷与部分非相干(暗/亮)光束的自陷只能发生在非瞬时的非线性介质中.对于瞬时的光学非线性介质,它将对瞬时的光束“散斑”响应,每一个散斑将形成一个小的“正透镜”(在自聚焦介质中)并俘获一部分光束,或“负透镜”(在自散焦介质中),光束上的这些亮暗特性通过传播迅速改变,这些细小的感应波导以任意方式彼此交叉和穿越,其净效应将使光束破裂成小碎片,因此光束的自陷不能发生.其次,正如相干光和部分非相干光暗孤子那样,相位初始条件极为重要.欲产生一维完全

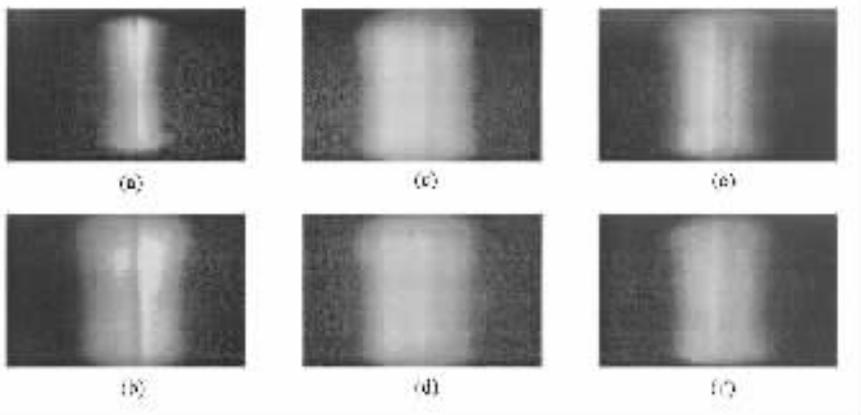


图 3 由振幅掩模产生的灰孤子对和白光在感应波导内的自导向 (a)输入光束,(b) $t = 0$  时的输出光束,(c)和(d)分别为辐照 5 h 写入和读出的输出光束 (e)和(f)分别为辐照 11 h 后写入和读出的输出光束

非相干白光暗空间孤子,在相位掩模的情况下,要求在载光束白光的光场中有  $\pi$  相位的跃变;在振幅掩模的情况下,要求光场中有相位的连续变化;二维的完全非相干白光暗空间孤子(涡旋孤子)要求光场中心有螺旋式相位梯度为  $2m\pi$  变化的结构<sup>[12,13]</sup>( $m$  为拓扑核,即涡旋角动量,整数)。第三,同所有暗孤子产生的条件一样,载光束白光的平均光强引起的自散焦非线性必须严格抵消暗光束的衍射。由于非相干光束的衍射远强于相干光和部分非相干光,因而在同样的辐照功率下,形成暗孤子需要的时间要长得多。最后暗光束的自陷必须是自洽的,即多模光束在它感应的波导内自导向,这意味着光束的时间平均光强必须对应于非线性感应波导内导向模的时间平均布居数的叠加。

### 3.2. 相位记忆效应

部分非相干单色光屏蔽暗空间孤子的实验和理论都指出,由于暗空间孤子内同时存在辐射模和束缚模,因此这类孤子一定是灰孤子。暗孤子的平均光强  $I_s$  可以认为是辐射模平均强度  $I_r$  与束缚模平均强度  $I_b$  的叠加<sup>[14,15]</sup>。在相位掩模的实验中,灰孤子形成的原理如图 4 所示。

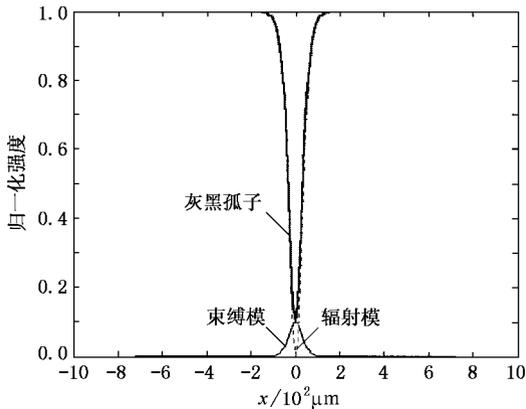


图 4 由相位掩模形成的灰孤子原理示意图。细虚线、细实线、粗实线分别为辐射模、束缚模和灰孤子的归一化平均光强曲线。

图 4 的横坐标表示孤子在晶体输入面上的横向坐标  $x$ ,纵坐标表示归一化强度。图 4 中细虚线、细实线分别表示波长为  $\lambda + \Delta\lambda$  的单色类黑孤子内的辐射模、束缚模的归一化平均光强,粗实线表示孤子本身的归一化平均光强分布。图 1(d)的暗迹中央还有一条细亮线,由于太弱从照片上看不到,但是当把激光作为探测光束引入孤子感应波导时,波导通道

区正中有一条细黑线(见图 1(1))。这说明原来暗孤子中央确实存在一条亮线,即束缚模,由于  $I_r \gg I_b$ ,所以形成灰孤子(灰度很小)。在振幅掩模的情况下,两条暗迹内束缚模的个数比相位掩模时多,强度也大,因而形成的孤子对灰度较大。灰孤子对形成的演化过程清楚地说明在光生伏打非线性介质中存在着“相位记忆”效应:即当存在非线性时,非相干暗光束趋于记住它的初始相位和强度的分布,然后光束以准相干的方式开始传播。而这种“相位记忆”效应在线性介质中是不存在的,非相干光在线性介质中传播时,所有的相位信息在经过有限的距离后将完全消失<sup>[11]</sup>。由于灰孤子内部模结构的强度最大值各不相同,随着辐照时间的延长介质的非线性逐渐增强,它只能逐渐记下晶体输入面上暗光束的初始相位及强度的完全分布,因此这一过程延续的时间比较长。至于“相位记忆”效应的微观机制至今尚不清楚。

### 3.3. 完全非相干白光暗空间孤子与部分非相干光及相干光暗空间孤子的比较

我们多年来用相干光对  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中的各种光生伏打空间孤子进行过深入研究<sup>[16-21]</sup>,现将完全非相干白光暗空间孤子与部分非相干光及相干光暗空间孤子进行比较。首先,完全非相干白光暗空间孤子与单色部分非相干暗空间孤子都只能在非瞬时的非线性介质中产生,而相干光暗孤子既可以在瞬时非线性介质中产生,也可以在非瞬时非线性介质中产生。另外,在相同的辐照功率和同样的调制深度(暗迹与载光束的对比度)的条件下,相干光暗空间孤子形成的时间比另外两种非相干光暗空间孤子的形成时间要短得多。其次,完全非相干白光暗空间孤子与单色部分非相干暗空间孤子一样,它们一定是灰孤子。前者的灰度只取决于载暗迹的白光初始被调制的深度,无论是奇数还是偶数初始条件,在晶体的输入面上,暗迹与白光之间的强度对比度越大,最后形成的孤子越黑(灰度越小),其感应波导越容易产生。而后者的灰度除了初始的调制深度之外还取决于单色部分非相干载暗迹光束本身的相干度(可通过平均散斑尺寸测量),载暗迹的光束在空间上越不相干(平均散斑尺寸越小),自陷的暗迹灰度越大,达到自陷所需要的非线性越强<sup>[10]</sup>。但是相干光暗空间孤子可以是黑孤子(即光场中心有零强

度分布),也可以是灰孤子.第三,完全非相干白光暗空间孤子与单色部分非相干暗空间孤子及相干光暗孤子都有沿晶体  $c$  轴移动的位移现象,这是光折变效应扩散场作用的结果,与产生非线性的光生伏打电场无关<sup>[22]</sup>.第四,同相位的相干光亮空间孤子之间的作用力为吸引力,反相位的相干光亮空间孤子之间的作用力为排斥力,暗孤子之间总是排斥力.但是非相干亮孤子由于它们之间没有干涉效应,在交叠区只能是光强的叠加,因此孤子之间的作用力总是吸引力.我们由白光定向耦合器的实验结果(将另文报道)表明,完全非相干白光形成的暗孤子之间,即使它们相距很近也几乎没有作用力.

最后需指出:我们的实验与完全非相干白光屏蔽型亮空间孤子的实验<sup>[7]</sup>除了不需要外加电场之外,还有两点不同之处:后者将白光通过滤波器使光的频率限制在 380—720 nm 之间,并且将准直后的平行光通过一个偏振片使之变为线偏振光.我们没有使用滤波器和偏振片,而是直接用普通白炽灯发出的频带更宽的多模自然光.由于自然光可以分解为彼此独立的、有等振幅的互相垂直的两种偏振光,它们的偏振方向可以分别平行和垂直于晶体的  $c$

轴,这样就等效于用含有各种波长的“ $o$ ”光和“ $e$ ”光照射晶体,所形成的暗孤子的平均强度为上述两束光分别产生的暗孤子的平均强度的叠加.

## 4. 结 论

我们使用白炽灯作为光源在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体内观察到由完全非相干白光产生的一维光生伏打暗空间孤子.由相位掩模产生了一个灰孤子,其感应波导能很好地导向单色相干光和白光.由振幅掩模产生了一对灰孤子,并用相干光清楚地探测到它们内部同时存在辐射模和束缚模,这从实验上证明了非相干孤子一定是灰孤子的理论解释是正确的.同时也证明了白光在  $\gamma$  结灰孤子对感应的波导中能够自导向.我们认为这些暗孤子的形成与传播行为与光生伏打非线性引起的“相位记忆”效应有关.而这些孤子沿晶体  $c$  轴的位移现象则起源于扩散场的作用.同时,实验也指出了用低功率白炽灯这样的普通白光光源在非线性自散焦介质中产生暗空间孤子,并利用其感应波导实现用非相干白光暗空间孤子控制和导向相干光的可能性.

- [ 1 ] Segev M, Crosignani B *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 923
- [ 2 ] Crosignani B, Segev M *et al* 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 446
- [ 3 ] Shih M, Segev M *et al* 1995 *Electro. Lett.* **31** 826
- [ 4 ] Taya M, Bashaw M *et al* 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3095
- [ 5 ] Segev M, Valley G *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 1764
- [ 6 ] Mitchell M, Chen Z G *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 490
- [ 7 ] Mitchell M, Segev M 1997 *Nature* **387** 880
- [ 8 ] Wang X S *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 573 ( in Chinese ) [ 王晓生等 2002 物理学报 **51** 573 ]
- [ 9 ] Christodoulides D, Coskun T *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 646
- [ 10 ] Chen Z G, Mitchell M *et al* 1998 *Science* **280** 889
- [ 11 ] Coskun T, Christodoulides D *et al* 1999 *Phys. Rev. E* **59** R4777
- [ 12 ] Chen Z G, Segev M *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 1160
- [ 13 ] Chen Z G, Segev M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2948
- [ 14 ] Christodoulides D, Coskun T *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 5113
- [ 15 ] Mitchell M, Segev M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 4990
- [ 16 ] Liu S M, Zhang G Q *et al* 1996 *Chin. Phys. Lett.* **13** 737
- [ 17 ] Zhang G Q, Liu S M *et al* 1996 *Chin. Phys. Lett.* **13** 101
- [ 18 ] Liu S M, Zhang G Q *et al* 1997 *Appl. Opt.* **36** 8982
- [ 19 ] Liu S M *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 432 ( in Chinese ) [ 刘思敏等 1998 物理学报 **47** 432 ]
- [ 20 ] Ling Z F *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 455 ( in Chinese ) [ 凌振芳等 2000 物理学报 **49** 455 ]
- [ 21 ] Lu Y *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1300 ( in Chinese ) [ 陆 猗等 2002 物理学报 **51** 1300 ]
- [ 22 ] Carvalho M, Singh S *et al* 1995 *Opt. Commun.* **120** 311

# One-dimensional photovoltaic dark spatial solitons with fully incoherent white light \*

Lu Yi<sup>1)</sup> Liu Si-Min<sup>2)</sup> Guo Ru<sup>2)</sup> Yang Li-Sen<sup>3)</sup> Huang Chun-Fu<sup>2)</sup> Wang Da-Yun<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*( Department of Automatic Engineering , Tianjin Institute of Technology , Tianjin 300191 ,China )*

<sup>2)</sup>*( Department of Physics , Nankai University , Tianjin 300071 , China )*

<sup>3)</sup>*( Department of Physics , Inner Mongolia Normal University , Huhehot 010022 ,China )*

( Received 17 February 2003 ; revised manuscript received 26 March 2003 )

## Abstract

We have experimentally observed , one-dimensional photovoltaic dark spatial solitons in  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  crystal using white light from an incandescent lamp. A black-like soliton and a pair of gray solitons are excited from odd and even initial conditions , respectively. The waveguides induced by them can guide both incoherent white light and coherent light. Their multi-mode structures are clearly observed by a probe coherent beam. The experiments demonstrate the presence of one-dimensional white light photovoltaic dark spatial solitons and show that it is possible that the coherent beams are controlled and guided by fully incoherent white light dark spatial solitons.

**Keywords :** photovoltaic effect , self-trapping , fully incoherent solitons , waveguides

**PACC :** 4265S , 4280L

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60078013 and 60278006 ).