

# 光折变空间光孤子的顶侧面观测法<sup>\*</sup>

王 程 刘劲松<sup>†</sup> 张光勇 刘时雄 张绘蓝

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

(2006年3月23日收到 2006年4月18日收到修改稿)

基于 CCD 图像采集技术与计算机软件处理技术, 提出了空间光孤子的顶侧面观测法。此方法能够非常直观地显示出光孤子在晶体内部传输时, 在水平及垂直方向上不同位置的轮廓图。用这种方法观测到了 KNSBN 晶体中的二维光伏明孤子, 观测结果与理论模拟结果相一致。

关键词: 空间光孤子, 光折变非线性光学, 光伏效应

PACC: 4265S, 4265J, 7240, 7820W

## 1. 引 言

空间光孤子作为非线性光学的一个重要分支, 具有重要的学术价值<sup>[1-3]</sup>。同时, 通过操纵系统参数来控制孤子的状态, 可望实现开关、互连、逻辑等功能, 有望实现一类新型的光子器件——空间孤子驱动的光子器件, 在信息处理(如全光空间调制和图像处理, 全光开关, 全光互连以及全光逻辑光路等)方面有着广泛的应用前景。因此, 近年来得到了日益广泛的研究<sup>[4-14]</sup>。

光折变空间光孤子以其写入光功率低、写入波导的存储期长、能形成(2+1)维波导等特点, 成为近年来孤子物理中最为活跃的研究领域之一<sup>[15, 16]</sup>。这方面的详细情况, 可参阅文献[17]。

实验观测是研究空间光孤子的一个重要手段。对于光折变空间光孤子, 人们已经采用了以下观测方法。

第一种是 Duree 等人采用的成像反推法<sup>[3]</sup>。其原理是通过成像透镜将入射面上的光斑成像在二维二极管探测阵列上, 前后移动成像透镜及探测阵列, 通过计算可探测出晶体内部不同位置的光束断面尺寸。这种方法首先须在阵列上测出的光斑尺寸, 然后利用公式反推出晶体内部不同位置的光束尺寸。用这种方法时需要注意的是: 由于入射光束是高斯光束, 因而在计算晶体不同位置的光斑尺寸时, 不能利用

简单的几何光学成像公式, 而必须要用 ABCD 法则进行计算, 因此计算起来比较麻烦, 结果不够直观。由于这种方法的实验装置比较容易实现, 目前在孤子的观测实验中还在广泛应用, 只不过随着 CCD 技术的兴起, 人们将二维二极管探测阵列替换为 CCD 探测阵列<sup>[18]</sup>。

第二种方法是由 Shih 等人采用的晶体切割法<sup>[19]</sup>。实验中将 SBN 晶体切成 15° 的小坡度, 将小坡度一面作为输出面, 然后在不改变其他参数的情况下, 平行移动光束, 将光束由 3.15 mm 处移动到 3.85 mm 处, 然后测出输出端面的光斑尺寸, 这种方法相对第一种方法而言比较直观, 因为这种方法避免了对光束在晶体内部传输时的计算, 但是这种方法由于要切割晶体, 因而对做实验的条件要求比较高, 做实验时相对麻烦。

以上两种方法的共同点是要测出光束的正面端视图, 故可称为端视法。其故有的缺点是, 在测试光束的水平及垂直方向的轮廓时, 一般需要对光斑中心线进行定位, 而光斑往往不很规则, 造成了定位的困难。此外, 为了测试晶体内部不同位置的光斑轮廓, 需要前后移动成像透镜, 这将导致图像位置的细微变化, 在重新定位时将带来误差。

第三种方法是顶视法<sup>[20]</sup>。这种方法的核心是对光束在晶体中传播的轨迹从晶体顶面直接成像。通过对光束轨迹图像分析光束是否形成了空间孤子。Matthew 等人在观测准稳态孤子诱导的波导实验中

\* 国家自然科学基金(批准号: 10574051 和 10174025)资助的课题。

† E-mail: jsliu4508@vip.sina.com

采用过这种方法<sup>[20]</sup>,在 Shih 等人采用的晶体切割法观测孤子的实验中也提到了这种方法<sup>[19]</sup>。他们只给出了光束轨迹的顶视图,没有给出晶体中不同位置处光束横向空间分布的轮廓。

如上所述,虽然顶视法以其直观明了、简单易行而成为一种观测光折变孤子的较好方法,但它只是给出了顶视图,而没有给出晶体中不同横断面的光波形状,难以同理论分析结果相对比。为此,我们基于 CCD 图像采集技术和计算机软件处理技术,提出了一种新的测量方法,即顶侧面观测法。这种方法不仅能给出孤子在晶体中传输的顶视图和侧视图,而且能给出晶体中任意横断面处光束在水平和垂直方向上的空间分布。我们用这种方法测量了 Cu : KNSBN 中的二维光伏明孤子(也称亮孤子)。结果表明,我们的方法不仅行之有效,而且观测结果与理论模拟结果相一致。这种顶侧面观测法不仅可以用于观测各种类型的光折变孤子,也可用于观测其他类型的空间光孤子。

## 2. 顶侧面观测法

图 1 给出了光折变空间孤子顶侧面观测法的原理图。其基本思路是,当光束穿过光折变晶体,达到稳态后,首先用 CCD 分别从顶面及侧面拍摄光束在晶体中传输的轨迹。然后将拍摄到的图像通过视频采集卡传到 PC 机,经软件处理后,可以读取出晶体中光束传播方向上任意位置处光束横向空间分布的轮廓图以及半高全宽(FWHM)等参量的值。从顶面

和侧面拍摄到的图片中提取到的轮廓图,分别反映的是光束横向空间分布在水平和垂直方向上的轮廓图。在不同的位置上分别提取这样的轮廓图,不仅能得到光束在晶体中的横向空间分布的演化规律,从而判断出光束是否演化成为空间孤子,而且能得到光波横向空间分布的演化图,从而得以同理论模拟结果相对比。同以往的方法相比,能给出光波横向空间分布在水平和垂直方向上的演化图,是本方法的独到之处。

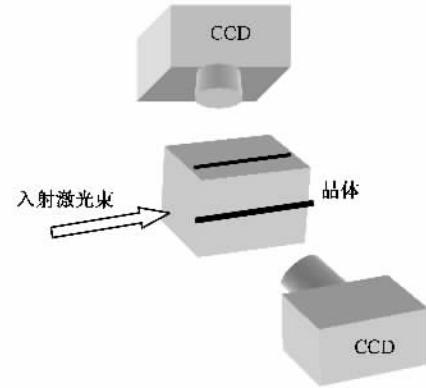


图 1 光折变空间孤子顶侧面观测法示意图

图 2(a)为标定光束宽度的原理图。右边为光折变晶体,左边是钢尺做为参照标尺。图中的同心圆环是上层软件做的软标尺。为了进一步看清孤子和标尺的对应关系,对图像的局部作了放大。局部放大处理后的图像如图 2(b)所示。由此方法可很直观地判断出孤子的尺寸在  $10 \mu\text{m}$  量级。

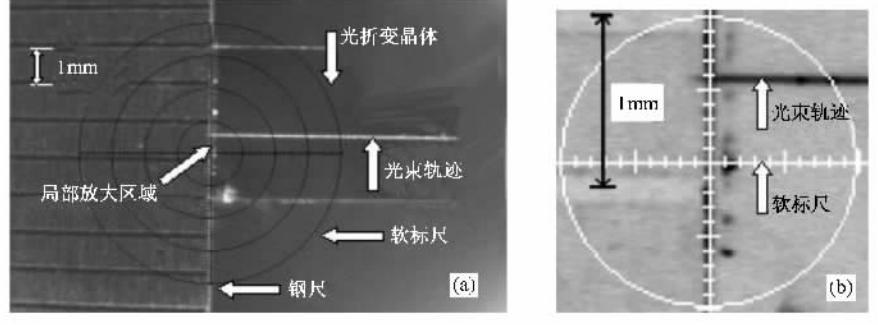


图 2 (a) 从顶视图中标定光束宽度的原理图 (b) 局部放大图

## 3. KNSBN 晶体中光伏明孤子的观测

我们用上述方法测量了 Cu : KNSBN 中的二维光伏明孤子,实验装置图如图 3 所示。晶体是  $4 \text{ mm} \times$

$5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的 Cu : KNSBN 光伏光折变晶体,光轴平行于  $5 \text{ mm}$  边。光源是  $532 \text{ nm}$  倍频 YAG 激光器。入射光束沿着  $6 \text{ mm}$  的长边方向传输,以非常光的方式偏振。通过移动透镜可以调整入射到晶体表面光束的光斑尺寸,当入射光束稳定后,分别拍摄光束轨

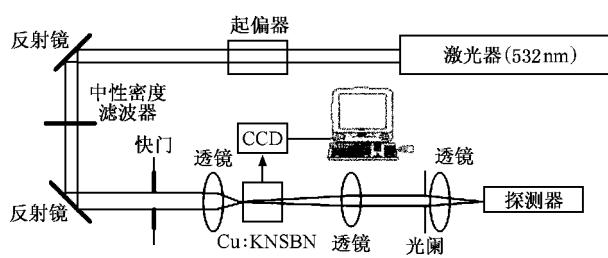


图 3 新型顶视图观测法实验装置图

迹的顶视图和侧视图。对图片加以分析，判断光束是否演化成了空间孤子。图 4 给出了入射光功率为  $50 \mu\text{W}$ ，入射光斑尺寸大约为  $50 \mu\text{m}$  的光束在晶体中传播轨迹的顶视图与侧视图。图 5 给出了经软件处

理后得到的光束横向空间分布不同位置处在水平和垂直方向上的轮廓图。可看出，不管是水平方向还是垂直方向，虽然光束在传播过程中的外形略有变化，但其 FWHM 基本维持在  $53 \mu\text{m}$ 。因此，可以肯定，这束光波在这块 Cu :KNSBN 晶体中形成了二维空间明孤子，即二维光伏明孤子。



图 4 Cu :KNSBN 晶体中光束传播轨迹的(a)顶端图和(b)侧视图

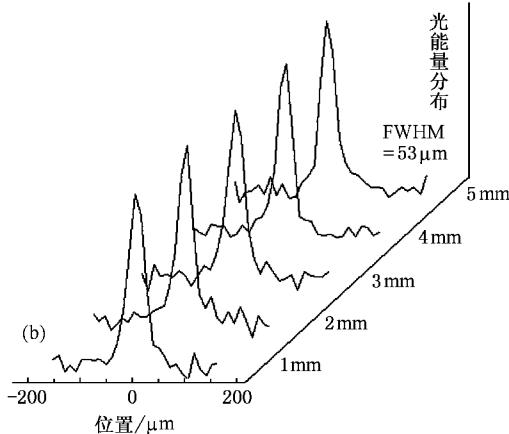
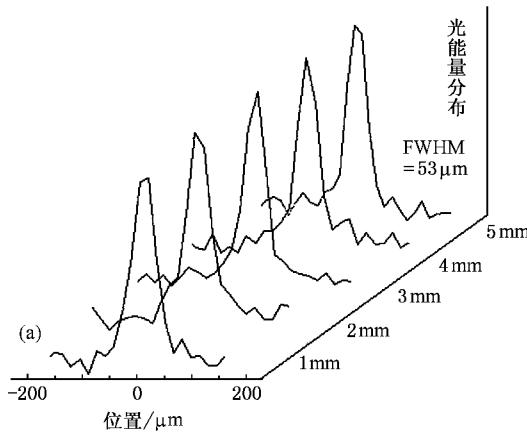


图 5 Cu :KNSBN 晶体中二维光伏明孤子在不同位置处(a)水平和(b)垂直方向上的轮廓图

#### 4. KBSBN 晶体中光伏明孤子演化的理论模拟

设  $U$  为光波的归一化包络，由光伏明孤子的一维演化模型<sup>[10, 18, 21]</sup>， $U$  满足以下动态演化方程：

$$iU_{\xi} + \frac{1}{2}U_{ss} + \alpha \frac{|U|^2}{1+|U|^2}U = 0, \quad (1)$$

式中， $s = x/x_0$ ， $x$  是光束水平方向的坐标， $x_0$  为一个任意的空间长度， $\xi = z/z_0$ ， $z$  是光束传播方向上的空间坐标， $z_0 = kx_0^2$ ， $k = n_e k_0$ ， $n_e$  是寻常光的折射率， $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ， $\lambda_0$  是光波波长， $\alpha = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33}/2)$ ， $E_p$ ， $r_{33}$  是电光系数， $E_p$  为光伏场常数。对 Cu :KNSBN 晶体，有<sup>[18]</sup>  $E_p = 28 \text{ kV/cm}$ ， $r_{33} = 200 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ， $n_e = 2.27$ 。取  $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ ， $x_0 = 25 \text{ nm}$ ，数值求解方程(1)，得到光伏明孤子的动态演化波形如图 6 所示。与图 5 相对比，观测结果与理论模拟结果在反映光

波的演化特性上基本相同。

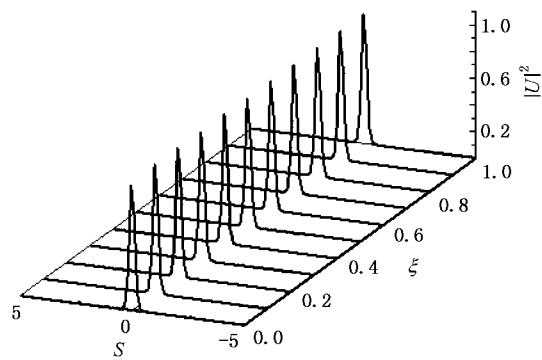


图 6 Cu :KNSBN 晶体中光伏明孤子动态演化的数值模拟图

#### 5. 结 论

本文在以往用于测量光折变孤子的顶视图观测法的基础上，提出了顶侧面观测法。基本思路是分别从

顶面及侧面拍摄光束在晶体中传播的轨迹 ,并经软件处理后 ,获得晶体中光束传播方向上任意位置处光束横向空间分布在水平和垂直方向上的轮廓图以及半高全宽等参量的值。

以往采用的端视法 ,往往只给出晶体入射和出射面上的光束轮廓 . 以往的顶视法 ,只给出了光束轨迹的顶视图 . 本文采用的方法 ,不仅可以同时给出光束传播轨迹的顶视图和侧视图 ,而且可以给出晶体内任意位置处光束横向空间分布在水平和垂直方向上的轮廓图 . 正是本方法的这种独到之处 ,使得从实验上观测光束在晶体内的传播演化过程提供了可能 ,以往这样的演化过程往往只能通过数值模拟而得到 . 所以 ,我们的工作为空间孤子的理论和实验研究搭起了一座桥梁 .

我们用顶侧面观测法观测到了 KNSBN 晶体中

的二维光伏明孤子 ,得到的孤子空间演化特性 ,与理论模拟结果相一致 . 本方法可望用来测量其他类型的光折变孤子<sup>[22-25]</sup> ,并对设计其他类型空间光孤子的测量方法有一定的参考价值 . 值得注意的是 ,用这种方法观测光折变晶体中的屏蔽孤子或屏蔽光伏孤子时 ,由于此时晶体的一对侧面需要镀电极 ,从而难以透过这对侧面来观测晶体内部光波的分布 . 此时就只能得到光束传播轨迹的顶视图或侧视图 ,而无法同时得到它们 . 不过 ,对一维孤子来说 ,透过顶面或侧面来观测 ,已经足够 ,不需要同时得到顶视图和侧视图 . 即使是二维孤子 ,虽然实验上能同时得到顶视图和侧视图最为理想 ,但由于针对二维孤子的理论分析 ,在绝大部分情况下都是一维的 ,所以 ,只得到顶视图或侧视图 ,在绝大部分情况下能满足理论和实验对比的需要 .

- [ 1 ] Zabusky N T , Kruskal M D 1965 *Phys. Rev. Lett.* **15** 240
- [ 2 ] Hasegawa A , Tappert F 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 142
- [ 3 ] Duree G C , Shultz J L , Salamo G J et al 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 533
- [ 4 ] Chen Z G , Mitchell M , Shih M et al 1996 *Opt. Lett.* **21** 629
- [ 5 ] Montemezzani C , Gunter P 1997 *Opt. Lett.* **22** 451
- [ 6 ] Segev M , Valley G C , Crosignani B et al 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3211
- [ 7 ] Christodoulides D N , Carvalho M I 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1628
- [ 8 ] Valley G C , Segev M 1994 *Phys. Rev. A* **50** R4457
- [ 9 ] Taya M , Bashaw M C , Fejer M M 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3095
- [ 10 ] Liu J S , Lu K Q 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 550
- [ 11 ] Cohen O , Carmon T , Segev M et al 2002 *Opt. Lett.* **27** 2031
- [ 12 ] Yang L S , Liu S M , Zhang G Y et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 461 ( in Chinese ) [ 杨立森、刘思敏、张光寅等 2004 物理学报 **53** 461 ]
- [ 13 ] Jiang X J , Li H G , Guo Q , Hu W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3771 ( in Chinese ) [ 江秀娟、李华刚、郭 旗、胡 巍 2004 物理学报 **53** 3771 ]
- [ 14 ] Jiang D S , She W L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2090 ( in Chinese ) [ 江德生、余卫龙 2005 物理学报 **54** 2090 ]
- [ 15 ] Rodrigo A V , Mario I M , Yuri S K 2003 *Opt. Lett.* **28** 1942
- [ 16 ] Bartal G , Cohen O , Manela O et al 2006 *Opt. Lett.* **31** 483
- [ 17 ] Wieslaw K , Barry L D , Cornelia D 2003 *IEEE J. Quantum Electron* **39** 3
- [ 18 ] She W L , Lee K K , Lee W K 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 3182
- [ 19 ] Shih M , Leach P , Segev M et al 1996 *Opt. Lett.* **21** 324
- [ 20 ] Matthew M , Galen D , Gregory S et al 1995 *Opt. Lett.* **20** 2066
- [ 21 ] Liu J S , Zhang D Y , Liang C H 2000 *Chin. Phys.* **9** 667
- [ 22 ] Xu C B , Guo Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5194 ( in Chinese ) [ 许超彬、郭 旗 2005 物理学报 **54** 5194 ]
- [ 23 ] Hou C F , Pei Y B , Zhou Z X , Sun X D 2005 *Chin. Phys.* **14** 349
- [ 24 ] Liu J S , Zhang H L , Zhang G Y , Wang C 2006 *Chin. Phys.* **15** 394
- [ 25 ] Guo Q , Zhang X P , Hu W , Shou Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1832 ( in Chinese ) [ 郭 旗、张霞萍、胡 巍、寿 倩 2006 物理学报 **55** 1832 ]

# Top- and side-view method for measuring photorefractive spatial optical solitons<sup>\*</sup>

Wang Cheng Liu Jin-Song<sup>†</sup> Zhang Guang-Yong Liu Shi-Xiong Zhang Hui-Lan

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

( Received 23 March 2006 ; revised manuscript received 18 April 2006 )

## Abstract

Basing on CCD technology and software processing , a new method , namely top- and side-view method , is presented for the observation of spatial optical solitons in photorefractive crystals . When a laser beam is propagating in a crystal , this method has an ability to show the horizontal and vertical outline of the beam at any location of the crystal very intuitively . By use of this method , we have experimentally observed the two-dimension bright photovoltaic solitons in a KNSBN crystal , and the measured results are qualitatively in agreement with the results of numerical simulation .

**Keywords** : spatial solitons , photorefractive nonlinear optics , photovoltaic effect

**PACC** : 4265S , 4265J , 7240 , 7820W

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10574051 and 10174025 ).

† E-mail : jsliu4508@vip.sina.com