

部分空间非相干光光伏空间孤子^{*}

王晓生 余卫龙[†]

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室 广州 510275)

(2001 年 7 月 23 日收到 2001 年 9 月 5 日收到修改稿)

对单色非相干光光伏空间孤子进行了理论研究,发现非相干光光伏空间孤子所满足的微分方程与相干光光伏空间孤子的具有相似性,并可用于近似描述相干距离远小于光束尺寸的部分空间非相干光光伏空间孤子.在 Cu:KNSBN 晶体中观察到单色光部分空间非相干光光伏空间亮孤子.

关键词:光伏,部分空间非相干,孤子

PACC:4265S,4265J

1 引言

关于光学空间孤子的研究已有 30 余年历史^[1].所谓光学空间孤子是指光束在介质中传播时,由于光束的非线性效应完全抵消光束的衍射效应而形成的一种光能量不扩散的传播状态.近 10 年来,光折变型空间孤子以其只需很低的入射功率^[2]等优点及其在全光开关^[3,4]、光波导^[5,6]等方面的潜在应用成为了研究热点.目前已发现和研究较多的光折变型空间孤子主要有三种基本的类型:屏蔽孤子^[7-17]、准稳态孤子^[2,18-22]和光伏孤子^[5,6,23-29].屏蔽孤子的形成一般需要一个外加的直流电场和一束均匀的背景光,它起源于外加电场的非均匀屏蔽.准稳态孤子的形成主要是由于在晶体内建立空间电荷场的过程中形成的折射率光栅对光束的散射.它一般需要外加电场而不需要背景光,但在一定条件下,也可以用光诱导的空间电荷场代替外加电场形成全光准稳态孤子^[21].光伏孤子的形成要求晶体有足够强的光伏效应,它是由光伏电流形成光伏场进而引起的晶体折射率变化所导致.它一般需要背景光而不需要外加电场,但在光伏晶体上外加电场也可以形成屏蔽-光伏孤子^[30-34].光折变空间孤子最初的理论和实验研究主要是针对空间相干光进行的,并不断有新的发现.相继报道了三维螺旋相互作用屏蔽孤子^[11]、光伏涡旋孤子^[25]、全光准稳态孤子^[21]、全光双准稳态

孤子^[22]、复色光光伏孤子^[28]等.1996 年开始,人们观察到部分空间非相干屏蔽孤子和非相干白光孤子^[12,13].随后建立了部分空间非相干屏蔽孤子的理论^[14-17].但是部分空间非相干光光伏孤子的理论和实验尚未见报道.本文对部分空间非相干光光伏孤子进行了理论研究,证明非相干光光伏孤子与相干光光伏孤子有相似的特性.利用这个理论,讨论了部分空间非相干光光伏空间孤子的情况,并在 Cu:KNSBN 晶体中形成了部分空间非相干光光伏空间亮孤子.

2 理论分析

在实验中,为更易于形成光伏孤子,一般加上一束与信号光同方向传播、对信号光而言是均匀的背景光.信号光一般为 e 光,背景光为 o 光.理论分析一般从描述光折变效应的速率方程、电流方程和空间电荷场的泊松方程开始^[35],考虑背景光的光伏效应^[29],忽略扩散场效应^[24],它们的稳态形式为

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

$$J = q\mu n_c E_{sc} + (S_s \kappa_{eff}^e I_s + S_b \kappa_{eff}^o I_b \chi N_d - N_d^i), \quad (2)$$

$$\nabla \cdot E_{sc} = -(q/\epsilon \chi n_c + N_a - N_d^i), \quad (3)$$

其中 κ_{eff}^e 和 κ_{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 为信号光和背景光光强, S_s , S_b 为

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10074082)、国家教育部重点科研项目基金(批准号:99197)及广东省自然科学基金(批准号:001192)资助的课题.

[†] 通讯联系人.

晶体对这两种光的吸收截面, n_c 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 为补偿已电离施主的电荷受主密度, β 为暗辐射率, γ 为复合率系数, J 为电流密度(这里假设 J 与 E_{sc} 同方向), μ 为电子迁移率, ϵ 为低频介电常量; $-q$ 为电子的电量, E_{sc} 为空间电荷场. 在垂直于信号光的传播方向上, 空间电荷场一般为二维的, 由它通过线性电光效应引起的折射率变化一般也应为二维的, 所以光伏孤子可以为二维的. 文献[27]已对空间电荷场作二维处理. 为方便起见, 本文的理论分析只考虑一维的情况. 因为本文所用的信号光为 e 光, 当非局域场的作用可忽略时, 采用一维处理所得到的空间电荷场与二维处理的结果在形式上一致. 本文的实验条件基本上满足非局域场可忽略的条件, 所以, 有关的理论结果可与实验相比较. 设信号光近似地沿垂直于晶体 c 轴方向入射, 信号光的传播方向取为坐标轴的 z 轴, c 轴方向取为坐标轴的 x 轴, 此时横向的另一个方向则为 y 轴. 如果取信号光光强只在 x 方向上变化, 而 y 方向上无变化(如文献[5]图 1(a)所示), 此时就为一维的情况, 空间电荷场只在 x 方向上有变化^[5]. 于是有 $\nabla \cdot E_{sc} = \frac{\partial E_{sc}}{\partial x}$ ^[24], 与文献[29]类似处理, 外电路开路情况下可以得到

$$E = -\frac{R + S_s I_s (S_b I_b)}{1 + S_s I_s (S_b I_b)}, \quad (4)$$

其中 $E = E_{sc}/E_p$, $E_p = \kappa_{eff}^e \gamma N_a / (q\mu)$, $R = \kappa_{eff}^0 / \kappa_{eff}^e$.

非相干光的传播与相干光的不同. 相干光的光斑内各点随时间一致地变化, 而非相干光的光斑内各点相互不关联. 这种光的整体传播行为就可分解成许多与光束轴线具有 θ 角度($\theta = k_x/k$)的“相干分量”的传播^[15], θ 取 $-\infty$ 到 $+\infty$. 理论处理中将连续的 θ 变为离散的 $j\Delta\theta$ ($j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 当 $\Delta\theta$ 趋于零时 θ 趋于连续. 众所周知, 在形成光学空间孤子过程中, 起关键作用的是光学非线性引起的折射率改变量 Δn . 对光折变空间孤子, $\Delta n = -0.5 n_b^3 r_{eff} E_{sc}$ (其中 n_b 为本底折射率, r_{eff} 为有效电光系数). 注意到非相干光光伏孤子的形成机制与非相干光屏蔽孤子的不同仅仅在于空间电荷场 E_{sc} 形式上的不同. 所以与文献[15]方程(4)类似, 对非相干光光伏空间孤子, 可得到信号光的波动方程为

$$i \left[\frac{\partial U_j}{\partial z} + (j\Delta\theta) \frac{\partial U_j}{\partial x} \right] + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x^2} - \frac{k_0}{2} n_b^3 r_{eff} E_{sc} U_j = 0, \quad (5)$$

其中 U_j 为 $\theta = j\Delta\theta$ 的分量的复振幅, k 为波数, k_0 为真空波数. 形成孤子时要求^[15]

$$U_j(x, z) = r_j'^{1/2} Q(x) \exp(j\tau z) \cdot \exp\{i[(j\Delta\theta)(kz/2) - j\Delta\theta kx]\} \quad (6)$$

其中 $r_j'^{1/2} = |U_j(0, 0)|^2 = I_{sj}(0)$, $0 \leq Q(x) \leq 1$ 为归一化的振幅波形分布, τ 为孤子传播常数.

从描述光折变效应的方程(1)–(3)可以看出, 介质的光折变效应主要是受时间平均光强的影响, 亦即它“看”不到迅速变化的相位, 所以(4)式对于非相干光同样适用. 此时式中 $I_s = \sum_j |U_j|^2$, 定义 $r_j = [S_s/S_b I_b] r_j'$, 则 $S_s I_s (S_b I_b) = \sum_j r_j Q^2(x)$. 设 $r_T = \sum_j r_j = S_s I_s(0) (S_b I_b)$, 将(4)和(6)式代入(5)式, 整理得

$$\frac{\partial^2 Q(x)}{\partial x^2} = Q(x) \left[2k\tau - k^2 n_b^2 r_{eff} E_p \frac{R + r_T Q^2(x)}{1 + r_T Q^2(x)} \right].$$

设 $\xi = x/d$, $d = (\pm k^2 n_b^2 r_{eff} E_p)^{-1/2}$, $\delta = 2k\tau / (k^2 n_b^2 r_{eff} E_p)$, $u(x) = r_T^{1/2} Q(x)$, 可得无量纲化的孤子方程为

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial \xi^2} = \pm u(x) \left[\delta - \frac{R + u^2(x)}{1 + u^2(x)} \right], \quad (7)$$

此时, $u(x) = [S_s I_s(0) (S_b I_b)]^{1/2} Q(x)$, r_{eff} 为正时, 方程等号右边取正号, r_{eff} 为负时, 方程等号右边取负号. 可以看出孤子方程(7)与文献[29]孤子方程(8)形式一样, 同时它们对亮(或暗)孤子具有相同的边界条件, 所以孤子的属性(例如孤子的形成条件、孤子半高宽的变化规律等)也应该一致.

3 实验结果

利用全线氩离子激光器作光源, 激光器的输出光束经分束镜分为反射和透射光束. 反射光束经旋光片、透镜 1、旋转散射器、起偏器 1、透镜 2、窄带滤光片 1 变为波长为 $488\mu\text{m}$ 的部分空间非相干 e 光作为信号光. 其中旋光片可调节信号光光强, 透镜 1 焦距为 18.1cm , 旋转散射器使光束成为部分空间非相干光, 图 1 示出旋转散射器静止(a)和高速转动(b)时的光斑图. 调节旋转散射器与透镜 1 的距离可以控制图(a)中光斑与光斑内斑点的尺寸比. 起偏器 1 使光束成为 e 光, 窄带滤光片使光束成为波长为 $488\mu\text{m}$ 的蓝光. 透射光束经窄带滤光片 3 成为波长为 $514.5\mu\text{m}$ 的绿光, 再由起偏器 2 变成 o 光作为背景光. 调节反射镜 2 及窄带滤光片 1 使背景光与信号光平行且信号光位于背景光中心. 减偏器及窄带

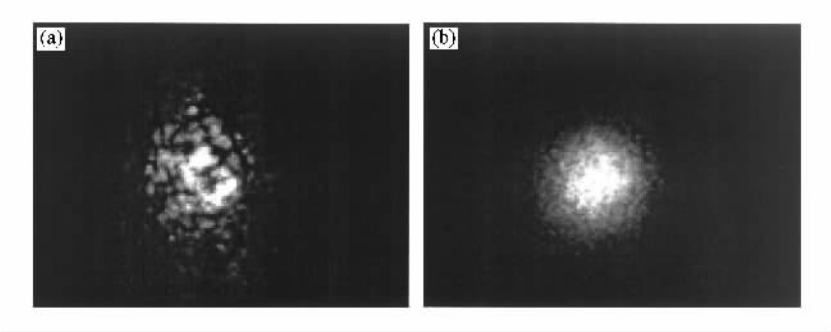


图 1 旋转散射器停止时 (a)和旋转时 (b)信号光光斑图

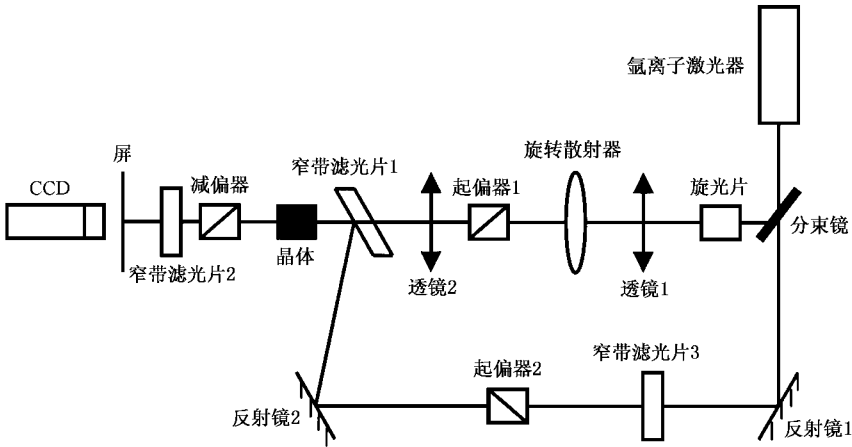


图 2 实验装置示意图

滤光片 2 滤掉背景光以使信号光易于观察.观察屏为薄描图纸,CCD 放于屏后拍像.实验光路如图 2 所示.

实验所用晶体为 $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 7\text{mm}$ 的 Cu :KNS-BN ,透光厚度为 6mm . c 轴水平放置,外电路开路.实验观察到信号光在晶体入射面处光强分布曲线半高宽(下同)为 $97\mu\text{m}$,不加背景光时信号光出射面半高宽为 $137\mu\text{m}$,没有晶体时对应晶体出射面处信号光半高宽为 $184\mu\text{m}$.形成孤子时晶体出射面半高宽为 $97\mu\text{m}$,此时信号光功率为 $183\mu\text{W}$,背景光功率为 200mW , $S_s I_s(0) (S_b I_b) = 0.306$,透镜 1 距离旋转散射器 8.5cm ,旋转散射器停止时的光斑与斑点尺寸比约为 9.晶体置于透镜 2 焦点后 2.83mm ,光束与晶体入射面法线夹角为 10.9° .实验结果如图 3 所示.图中上面为信号光光斑图,下面为信号光束横截面水平方向的光强分布曲线.在这种条件下获得了部分空间非相干光光伏空间亮孤子.实验还测得背景光半高宽为 1.637mm ,远大于信号光半高宽.所以

对于信号光,可以认为背景光是均匀的.

4 讨 论

部分空间非相干光是介于相干光与非相干光之间的中间光状态,一般用相干距离 L 来描述其相干性.相干距离 L 指光束横截面上位相相关的两点的平均距离.光束的发散角主要由 L 决定^[12].当 L 远小于光束的尺寸时,则光束可以认为是准空间非相干光.

实验中旋转散射器转速为 2800r/min ,旋转时图 1(a)所示的斑点随时间迅速地变化.其变化的速度远大于晶体的响应速度(在 SBN 晶体中,当光强为 1W/cm^2 时,响应时间约为 0.1s ^[12]).即晶体实际“感受”到的光强是瞬变光斑的平均效果,亦即“感受”到图 1(b)所示的光强.此时光束的相干距离远小于光束的尺寸,这种无规瞬变的光场就形成了一束与热光源发射出的相类似的准非相干光.因此,部分空间

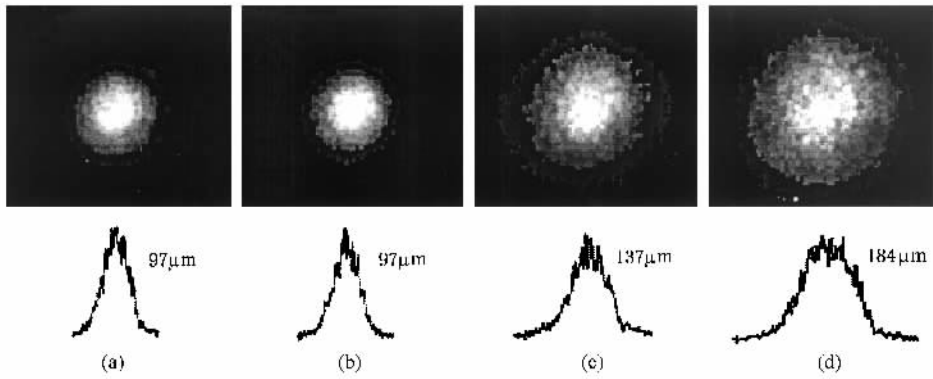


图3 部分空间非相干光光伏空间孤子实验结果 上图(a)为晶体入射面信号光光斑(b)为有背景光时晶体出射面光斑(c)为无背景光有晶体时晶体出射面光斑(d)为无晶体时对应晶体出射面处信号光光斑;下图为对应的光束横截面水平方向的光强分布曲线

非相干光光伏空间孤子应近似地受上述非相干光光伏空间孤子的规律所约束. 需要指出的是, 理论推导中信号光的波动方程从(5)式开始, 这是在光斑的发散角不是太大的情况下才适用. 所以如果光斑的发散角较大, 为了获得空间孤子, 应该在透镜2前面加一光阑控制信号光的发散角. 另外, 部分空间非相干光光斑中每个相干距离内的部分都自成一个独立的次波波源, 不同的波源发出的次波位相没有关联. 因此, 部分空间非相干光光束的发散角较之相干光大. 所以尽管部分空间非相干光光伏孤子的孤子特性与相干光的相似, 实验中形成孤子的半高宽也较之相干光孤子^[28, 29]大. 应该提及, 调节实验装置中的

透镜1与旋转散射器的距离, 可以改变图1(a)中光斑与斑点的尺寸比, 从而控制部分空间非相干光的相干距离, 进而影响其形成孤子的宽度.

5 结 论

本文对单色空间非相干光光伏空间孤子进行了理论研究, 证明非相干光光伏空间孤子理论可近似地描述相干距离远小于光束尺寸的部分空间非相干光光伏空间孤子, 在Cu:KNSBN晶体中获得了部分空间非相干光光伏空间亮孤子.

[1] Chiao R Y, Garmire E and Townes C H 1964 *Phys. Rev. Lett.* **13** 479
 [2] Duree G C Jr, Shultz J L, Salamo G J, Segev M, Yariv A, Crosignani B, Porto P D, Sharp E J and Neurgaonkar R R, 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 533
 [3] Shi T T and Chi S 1990 *Opt. Lett.* **15** 1123
 [4] Shalaby M and Barthelemy A 1991 *Opt. Lett.* **16** 1472
 [5] Taya M, Bashaw M C, Fejer M M, Segev M and Valley G C 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3095
 [6] Taya M, Bashaw M C, Fejer M M, Segev M and Valley G C 1996 *Opt. Lett.* **21** 943
 [7] Castillo M D I, Aguilar P A M, Sanchez-Mondragon J J, Stepanov S and Vyslouch V 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 408
 [8] Segev M, Valley G C, Crosignani B, Porto P D and Yariv A 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3211
 [9] Segev M, Shih M and Valley G C 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 706
 [10] Kos K, Meng H, Salamo G, Shih M, Segev M and Valley G C 1996 *Phys. Rev. E* **53** R4330

[11] Shih M, Segev M and Salamo G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2551
 [12] Mitchell M, Chen Z, Shih M and Segev M 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 490
 [13] Mitchell M and Segev M 1997 *Nature* **387** 880
 [14] Chen Z, Mitchell M, Segev M, Coskun T H and Christodoulides D N 1998 *Science* **280** 889
 [15] Christodoulides D N *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 646
 [16] Christodoulides D N *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 5113
 [17] Mitchell M, Segev M, Coskun T H and Christodoulides D N 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 4990
 [18] Segev M, Crosignani B, Yariv A and Fischer B 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 923
 [19] Maufroy J, Fressengeas N, Wolfersberger D and Kugel G 1999 *Phys. Rev. E* **59** 6116
 [20] Duree G, Morin M, Salamo G, Segev M, Crosignani B, Porto P D, Sharp E and Yariv A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 1978
 [21] She W L, Lee K K and Lee W K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2498
 [22] She W L and Lee W K 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 886 (in Chinese)
 [余卫龙、李荣基 2001 物理学报 **50** 886]

[23]

Segev M , Valley G C , Bashaw M C , Taya M and Fejer M M 1997 *J . Opt . Soc . Am . B* **14** 1772

[24]

Valley G C , Segev M , Crosignani B , Yariv A , Fejer M M and Bashaw M C 1994 *Phys . Rev . A* **50** R4457

[25]

Chen Z , Segev M , Wilson D W , Muller R E and Maker P D 1997 *Phys . Rev . Lett .* **78** 2948

[26]

She W L , Lee K K and Lee W K 1999 *Phys . Rev . Lett .* **83** 3182

[27]

Ling Z F , Guo R , Liu S M and Zhang G Y 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 455 (in Chinese)[凌振芳、郭 儒、刘思敏、张光寅 2000 物理学报 **49** 455]

[28]

Wang X S *et al* 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 496 (in Chinese) [王晓生等 2001 物理学报 **50** 496]

[29]

She W L *et al* 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 2166 (in Chinese)[余卫龙等 2001 物理学报 **50** 2166]

[30]

Liu J S *et al* 1998 *Acta Phys . Sin .* **47** 1509 (in Chinese)[刘劲松等 1998 物理学报 **47** 1509]

[31]

Lu K Q and Tang T T 1999 *Acta Phys . Sin .* **48** 2070 (in Chinese) [卢克清、唐天同 1999 物理学报 **48** 2070]

[32]

Hou C F *et al* 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1969 (in Chinese)[侯春风等 2000 物理学报 **49** 1969]

[33]

Liu J S *et al* 2000 *Chin . Phys .* **9** 667 .

[34]

Liu J S *et al* 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 880 (in Chinese)[刘劲松等 2001 物理学报 **50** 880]

[35]

Kukhtarev N V 1979 *Ferroelectrics* **22** 949

Partially spatially incoherent photovoltaic spatial soliton^{*}

Wang Xiao-Sheng She Wei-Long

(State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China)

(Received 23 July 2001 ; revised manuscript received 5 September 2001)

Abstract

A theory of spatially incoherent photovoltaic soliton of monochromatic light is presented. We find that the differential equation of spatially incoherent photovoltaic soliton is similar to that of spatially coherent photovoltaic soliton , and that the partially spatially incoherent photovoltaic spatial soliton can be approximately described by this theory. We have observed a partially spatially incoherent photovoltaic spatial bright soliton in a Cu :KNSBN crystal.

Keywords : photovoltaic , partially spatially incoherent , soliton

PACC : 4265S , 4265J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10074082) , the Foundation for Major Program from the Chinese Ministry of Education(Grant No. 99197) , and the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China(Grant No. 001192).