

文章编号 1004-924X(2016)增-0141-07

Ce : SBN75 光折变晶体中的离散空间 光孤子波导阵列

王 颖*, 张晓非, 梁宝来, 郭庆林, 王淑芳
(河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071002)

摘要:探讨了空间光孤子波导进行弱光束操纵强光束的可行性,研究了空间光孤子诱导波导的各向异性及其对离散孤子波导之间相互作用的影响。通过控制亚微瓦量级 532 nm 激光的入射光强和外加电压条件,在 Ce : SBN75 光折变晶体中平衡光折变自聚焦效应和激光束传输的扩散效应形成了稳定的(2+1)维空间屏蔽光孤子,并由此空间光孤子在该晶体中诱导出孤子波导,然后在水平和垂直方向上移动晶体位置获得离散空间光孤子波导阵列。利用晶体折射率弱敏感的 633 nm 宽光束激光与空间光孤子同轴传输并覆盖空间光孤子诱导出的光波导和离散空间光孤子二维波导阵列。结果表明,在 532 nm 激光的入射光强为 0.058 μW ,施加电压为 200 V 时空间光孤子可在 10 s 内形成,其诱导产生的光波导轮廓清晰;感应波导具有各向异性,各向异性会影响离散孤子波导之间的相互作用。该结果对利用空间光孤子波导实现二维信息的处理和传输具有重要意义。

关键词:光波导;光折变晶体;空间光孤子;离散孤子;各向异性

中图分类号:O799;O438 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0141

Waveguide array generated by discrete spatial soliton in Ce : SBN75 photorefractive crystal

WANG Ying*, ZHANG Xiao-fei, LIANG Bao-lai, GUO Qing-lin, WANG Shu-fang

(College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

* Corresponding author, E-mail: hbuwangying@126.com

Abstract: In order to verify the the feasibility of controlling intense light beam by weak light beam through the spatial soliton waveguide array, the anisotropy of soliton-induced waveguide and its effect on the interaction of discrete soliton waveguide were investigated. By controlling the incident light intensity of the 532 nm laser and the applied voltage, the photorefractive self-focusing effect and diffusion effect of the laser beam in the Ce : SBN75 photorefractive crystal were balanced to form the stable (2 + 1) dimensional spatial screening soliton, which could induce soliton waveguides. Then a waveguide array for discrete spatial solitons was generated by adjusting the crystal position vertically and horizontally. The optical waveguide and the two-dimensional spatial soliton waveguide array were detected through the coaxial transmittance of spatial solitons and the a 633 nm expanded-beam laser with weak sensitivity to crystal refraction index. It indicates that the spatial soliton is generated in 10 s and the induced optical waveguides have clear profile for the incident light intensity of 0.058 μm and the applied voltage of 200 V. The soliton-induced waveguides have anisotropy, which enables a certain impact on the interaction between

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-17.

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(No. A2015201046);河北大学实验室开放项目(No:sy201638)

discrete soliton waveguides. This result is of great significance to achieving processing and transmission of two-dimensional information by using the spatial solution waveguides.

Key words: optical waveguide; photorefractive crystal; spatial solitons; discrete solitons; anisotropies

1 引言

光折变空间光孤子以其独特的物理性质在全光器件、光计算等光电信息领域展示出广阔的应用前景^[1-4]。目前,已发现和研究的折变空间光孤子主要有准稳态孤子、屏蔽孤子和光伏孤子 3 种类型,它们在不同的实验条件下均能够以亮、暗、灰孤子的形式存在^[5-8]。实验研究发现,空间光孤子形成后能够在折变非线性连续介质中诱导出与介质波导类似结构的折射率轮廓,实现类似于普通石英波导一样的导波现象。折变空间光孤子诱导波导具有很多优点和研究价值。折变空间光孤子在 $(2+1)$ 维方向上可稳定存在,能够使三维光波导结构被感应到一整块介质的体积内^[9]。由于折变空间光孤子在横向两个尺度上都能维持稳定,所以实际上是光感应二维波导,这对于二维信息的处理和传输显然具有很重要的意义,可应用于光学逻辑门、光学偏转器、光学编码及光学存储、光学互联器等诸多方面^[10]。折变空间光孤子在弱光(μW 量级或更小)下可以产生折变效应且该效应依赖于波长的敏感性,因而可以用折变敏感波长的弱光产生光孤子波导,诱导另一束波长不敏感的强光沿此空间光孤子诱导波导同轴地传输,实现弱光对强光的控制和操纵,在光开关和集成光学中具有重要的应用价值^[11]。此外,实验上可以通过改变外加电场极性,或者晶体取向、入射光偏振方向来改变光致折变率,从而实现对孤子感应光波导的形状设

计^[12-13]。折变晶体具有的存储功能可以使得折变空间光孤子感应的波导在晶体中固化一段时间,在一定条件下还可实现永久的固化;而这种固化可以通过非相干光照射、晶体升温或电还原等方法擦除^[14-16],因此,光孤子感应波导又被称之为柔性波导。此独特性质可增加光学器件设计的灵活性和鲁棒性。

本文利用 Ce:SBN75 折变晶体中产生的折变屏蔽空间光孤子诱导出孤子波导,由折变率弱敏感的宽光束红光覆盖孤子波导并同轴传输,研究了孤子诱导波导的各向异性及其对波导相互作用的影响,并获得了离散孤子波导阵列。

2 实验装置

实验采用 Ce:SBN75 晶体,Ce 的质量分数 0.03%,晶体尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,光轴沿其中 5 mm 边的方向。实验装置如图 1 所示,实验中采用 532 nm Verdi 激光器为孤子光源,633 nm He-Ne 激光器为探测光源。Verdi 激光器产生的 e 偏振绿光经扩束准直系统和聚焦透镜(焦距为 150 mm)聚焦在晶体前表面上,透射光经成像透镜(焦距为 100 mm)成像到 Spiricon 公司的光束分析仪上(LBA),然后由计算机读取数据。He-Ne 激光器产生的红光经扩束准直系统和分光棱镜后与绿光同轴传输。Ce:SBN 晶体的光轴方向如图 1 所示,与入射激光束的传播方向相垂直,与外加电场方向相同。

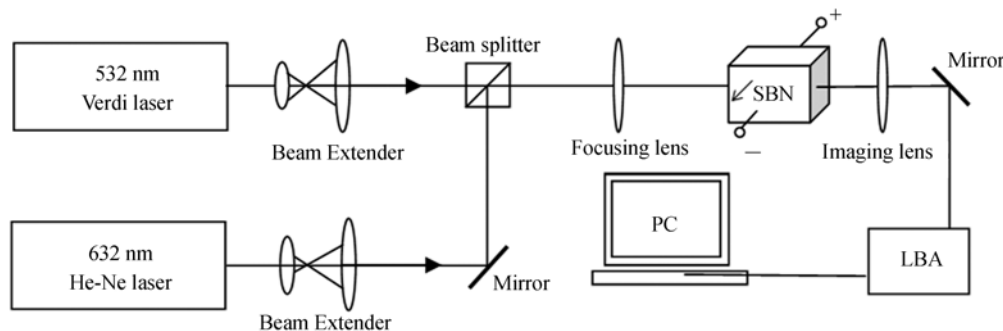


图 1 空间光孤子诱导实验装置图

Fig. 1 Schematic of setup for waveguide array generated by discrete spatial soliton

3 实验结果及讨论

3.1 532 nm 激光产生(2+1)维屏蔽空间孤子

在图 1 所示的实验装置中,只打开 Verdi 激光器,光强约为 $0.058 \mu\text{W}$ 的 e 偏振光聚焦到 Ce:SBN75 晶体的前表面,形成半高全宽(Full Width Half Maximum,FWHM)约为 $18 \mu\text{m}$ 的高斯型光斑,透过晶体的光束由于自然衍射在晶体

的后表面上形成 FWHM 约为 $40 \mu\text{m}$ 的光斑,如图 2(a)所示。然后对晶体施加正向电压,晶体后表面的光斑尺寸渐小,能量渐渐收缩增强产生自陷,同时光斑位置稍有偏移。当电压加到 200V 左右时,光斑收缩到晶体前表面的光斑形状,如图 2(b)所示,这表明已形成了光折变空间孤子。图 2(c)为图(a)、图(b)所示光斑在水平一维方向的光强分布图。

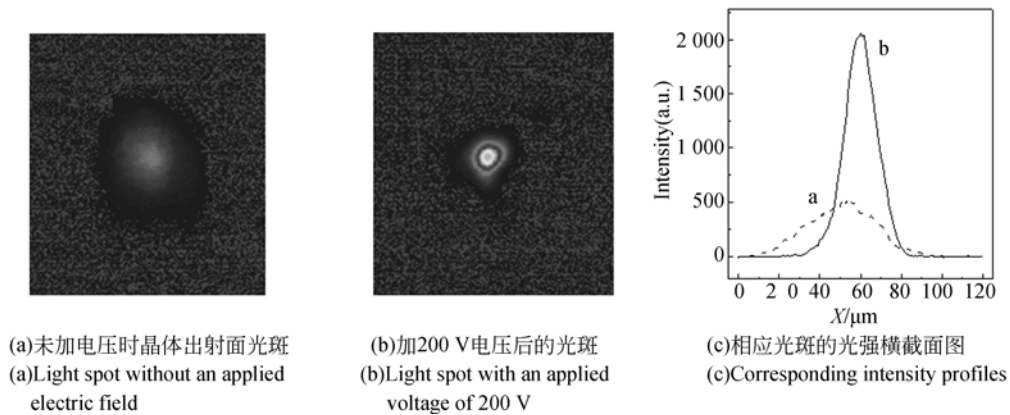


图 2 光功率为 $0.058 \mu\text{W}$,光束半高宽约为 $18 \mu\text{m}$ 的 532nm 激光通过晶体后的实验结果

Fig. 2 Beam profiles at output surface of crystal for 532nm input laser beam with a FWHM of $18 \mu\text{m}$ and a power of $0.058 \mu\text{W}$

为了了解光折变孤子的稳定情况,实验测试了不同施加电压下的孤子光束时间演化曲线,如图 3 所示。很明显,在入射光强为 $0.058 \mu\text{W}$,施加电压较小(200V 以下)时,光束的半高宽虽然也表现出明显收缩,但是均未达到晶体前表面光斑尺寸。即此条件下光折变引起的光束自聚焦没有完全补偿自然衍射引起的发散,所以光束随时间的演变渐成发散传输,不能形成孤子,也就不能诱导出波导。当施加电压为 200V 时,光孤子在 10s 内形成,且在光强和电场不变、无外界扰动情况下,孤子可稳定至少在 150s 以上。实验还发现当微位移放置晶体的平移台,使孤子光束入射到晶体的其他区域,孤子也能形成,而且同样具有图 2 和 3 所示的实验现象,即晶体具有比较均匀的质量。此外,当关掉孤子光 5min 再打开,孤子几乎在晶体出射面的同一位置瞬时形成,由此推测晶体中的低暗电导率致使晶体中感应的波导至少可稳定存在 5min 以上。

3.2 633 nm 激光探测孤子诱导波导

由于 Ce:SBN75 晶体的光折变敏感波段为

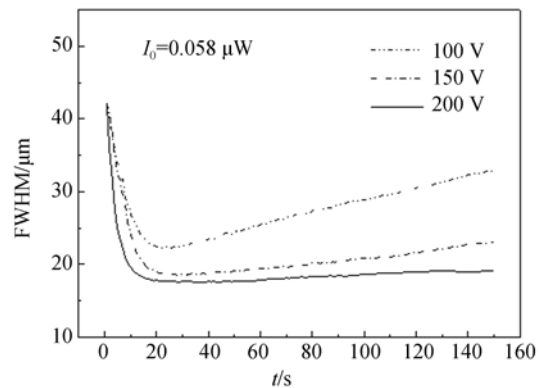


图 3 孤子光束的 FWHM 在不同电压下随时间的演变

Fig. 3 Variation of FWHM of soliton beam with time under different voltages

蓝绿光, 633nm 波长的红光对晶体来说属于弱敏感光束,所以采用 He-Ne 激光器作为探测光源。通过扩束使红色探测光束的直径比孤子光束的直径大 10 倍左右,为了减小探测光对波导可能产生的影响,把探测光束的光强设为 $0.622 \mu\text{W}$ 。首先调整两光束的位置,使红光探测光覆盖绿光孤子

光,并使两光同轴传输,用 LBA 采集两光束在晶体前后表面的图像,如图 4(a)和 4(b)所示。然后挡住红光探测光,只让绿光孤子光入射晶体,沿晶体光轴施加 200 V 正向电压,观测到光孤子形成。接着等光孤子稳定后再挡住绿光孤子光,打开红光探测光,让探测光扫描晶体,得到的图像如图 4(c)所示。

从图 4(c)中看到虽然挡住了孤子光,但探测光斑中心——原孤子波导位置的能量密度明显增加,必然是由于孤子诱导波导的导波作用,将此波导局域范围的光能量聚集所致。同时也发现此波导周围的光强分布并不均匀,符合文献中对孤子

诱导波导各向异性的描述。图 5(a)和 5(b)即为图 4(c)中通过光斑中心的水平和垂直方向的横截面光强分布。水平横截面光强分布在中心光斑两侧存在黑暗区域,可计算出此区域宽度约为 $30 \mu\text{m}$,而垂直横截面光强分布不存在此现象。这是因为在接近写入光束中心的区域内,折射率指数只沿着外加电场的方向下降,黑暗的区域反映出这部分具有很强的非局域性和折射率调制的各向异性^[17-21]。更深的折射率调制来源于晶体内部的静电势。孤子诱导波导的各向异性还能够用来解释两个或更多个光折变空间光孤子之间复杂的相互作用^[22-25]。

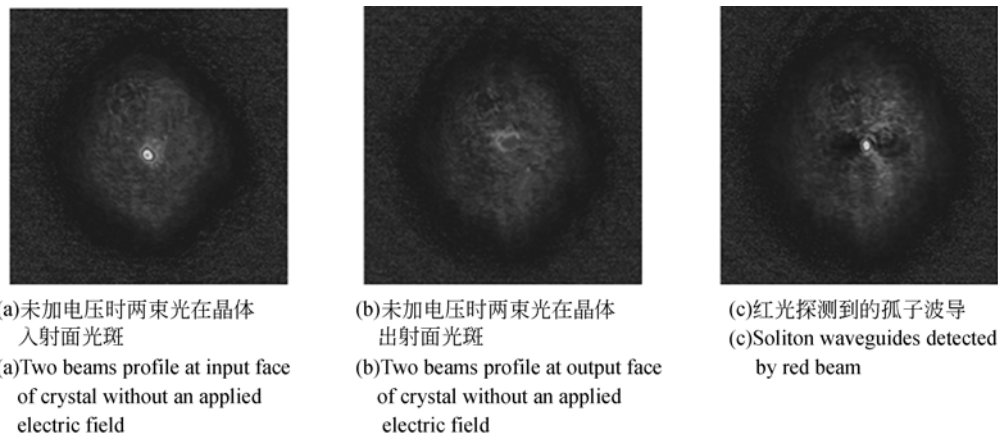


图 4 探测孤子诱导波导实验结果

Fig. 4 Detection results of waveguide induced by soliton

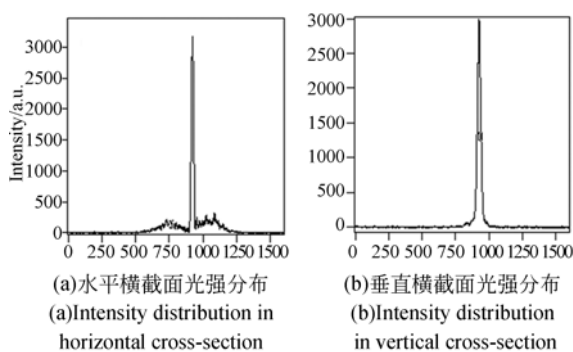


图 5 孤子诱导波导的各向异性

Fig. 5 Anisotropy of waveguide induced by soliton

3.3 激光探测离散孤子阵列

基于前文两部分的实验结果,进一步在晶体中开展了离散孤子实验。在相同的实验条件下,首先挡住红光探测光,打开绿光孤子光,入射晶体并形成孤子,然后分别沿水平和垂直两个方向微

位移晶体,让绿光在晶体新的位置也形成孤子,接着挡住绿光,打开探测光红光,通过光束分析仪记录图像。

考虑到孤子 FWHM 约为 $18 \mu\text{m}$,而光斑直径近 $30 \mu\text{m}$,首先在水平和垂直两个方向上分别移动晶体 $35 \mu\text{m}$,如图 6(a)和 6(b)所示。图 6(a)显示在水平方向上只存在位移 $35 \mu\text{m}$ 后形成的波导,而原孤子波导消失了。究其原因是因为晶体位移 $35 \mu\text{m}$ 后,原波导落在图 5(a)所示的新波导的暗区,此区域折射率较低,呈反波导分布,结果抵消掉了原波导的聚光能力。图 6(b)显示在垂直方向上由于只位移了 $35 \mu\text{m}$,先后形成的两个孤子波导距离很近,近似相切,所以红光汇聚到两波导里形成相连的孤子串,并且可观测到能量在这两个波导里有相互转移的现象。以上结果说明,在两个方向上分别移动晶体 $35 \mu\text{m}$ 会使两波

导相互影响和作用,产生排斥和吸引,这种现象的根本原因在于孤子诱导波导的各向异性。为了让孤子诱导的波导互相之间相互独立且互不影响,在水平和垂直方向上将晶体位移 $70 \mu\text{m}$,结果如图 6(c)和 6(d)所示。虽然在水平方向上孤子诱

导仍受到暗区的影响,但是也能观测到移位前后分别形成的两个波导。而垂直方向上,两个波导独立存在,相互之间没有能量转移。

在此实验条件下,我们分别在水平和垂直两个方向上获得了孤子波导阵列,如图 7 所示。

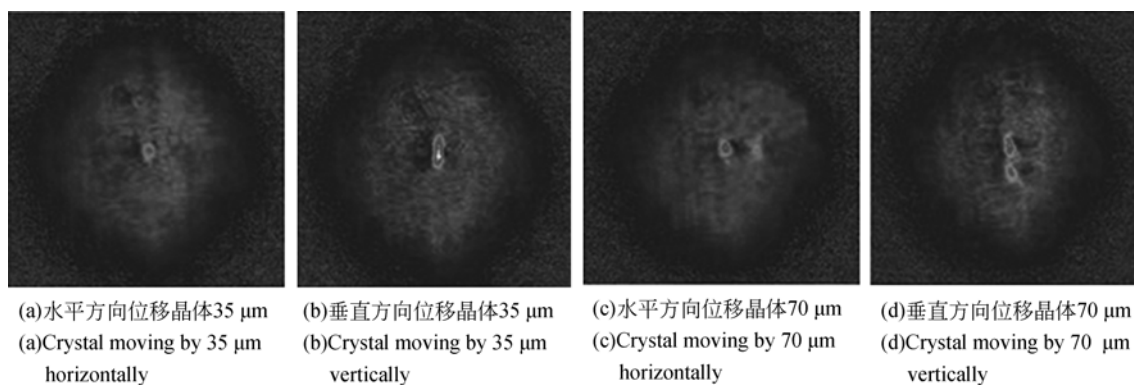


图 6 探测孤子诱导波导阵列

Fig. 6 Detection of waveguide array induced by soliton

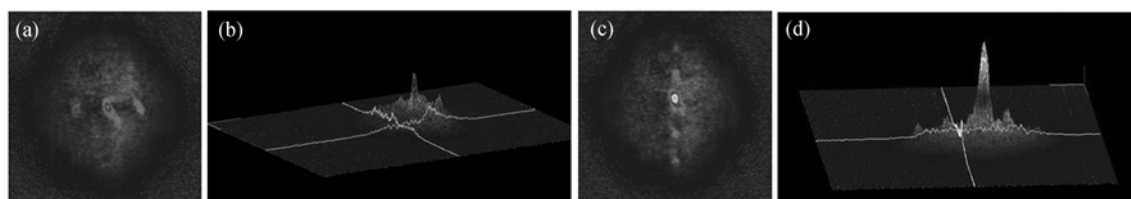


图 7 探测孤子诱导波导阵列(a)(b)水平方向位移晶体 $70 \mu\text{m}$ 及三维图;(c)(d)垂直方向位移晶体 $70 \mu\text{m}$ 和相应三维图

Fig. 7 Detection of waveguide array induced by soliton. (a) and (b) are obtained by displacing $70 \mu\text{m}$ of crystal horizontally and corresponding 3D graph; (c) and (d) are obtained by displacing $70 \mu\text{m}$ of crystal vertically and corresponding 3D graph

4 结 论

本文利用 532 nm 激光在 Ce : SBN75 晶体中形成了(2+1)维光折变屏蔽空间光孤子,并诱

导出孤子波导,然后利用对晶体折射率弱敏感的 632 nm 宽光束激光扫描覆盖该波导并同轴传输,证明了孤子波导的各向异性并成功获得了离散孤子波导阵列,从而为利用空间光孤子波导实现二维信息的处理和传输奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 张冰志,崔虎,余卫龙. 光折变空间孤子研究进展[J]. 物理,2008,37(3):152-161.
ZHANG B ZH, CUI H, SHE W L. Research progress of photorefractive spatial solitons[J]. *Physics*, 2008,37(3):152-161. (in Chinese)
- [2] 陈志刚. 奇妙的空间光孤子[J]. 物理,2001,3(12):752-756.
CHEN ZH G. Wonderful spatial optical solitons [J]. *Physics*, 2001,3(12):752-756. (in Chinese)
- [3] SEGEV M, CROSIGNANI B, YARIV A. Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68(7): 923-926.
- [4] 李克武,王志斌,张瑞,等. 沿光轴通光的 LiNbO_3 的横向电光调制特性[J]. 光学精密工程,2015,23

- (5):1227-1232.
- LI K W, WANG ZH B, ZHANG R, *et al.*. LiNbO₃ transverse electro-optical modulation characteristics for light pass along optical axis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1227-1232. (in Chinese)
- [5] SEGEV M, CROSIGNANI B, YARIV A, *et al.*. Spatial solitons in photorefractive media[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68(7):923-926.
- [6] 戴翠霞, 刘立人, 刘德安. 光折变空间光孤子[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(9):17-19.
- DAI C X, LIU L R, LIU D A. Photorefractive spatial solitons [J]. *The Progress of Laser and Optoelectronics*, 2005, 42(9):17-19. (in Chinese)
- [7] 侯春风, 李师群. 光折变介质中的空间孤子[J]. *物理学进展*, 2001, 21(2):237-254.
- HOU CH F, LI SH Q. Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Progress in Physics*, 2001, 21(2):237-254. (in Chinese)
- [8] GUO Q L, DENG G Y, LIANG B L, *et al.*. Solitons with periodic behavior in an SBN:75 photorefractive crystal[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, 27(8): 84204-84206.
- [9] DUREE G C, SHULTZ J L, SALAMO G J, *et al.*. Observation of self-trapping of an optical beam due to the photorefractive effect[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71(4): 533-536.
- [10] 张斌, 韩旭光, 冯其波, 等. 基于 BSO 晶体反射式全息光栅的振动测量系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1781-1786.
- ZHANG B, HAN X G, FENG Q B, *et al.*. Vibration measurement system based on reflection holographic grating of crystal BSO[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1781-1786. (in Chinese)
- [11] PETTER J, DENZ C. Guiding and dividing waves with photorefractive solitons[J]. *Opt. Commun.*, 2001, 188(1):55-61.
- [12] GUO Q L, LIANG B L, WANG Y, *et al.*. Propagation characteristics of a focused laser beam in a strontium barium niobate photorefractive crystal under reverse external electric field[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6422-64.
- [13] LIANG B L, GUO Q L, FU G SH, *et al.*. Photorefractive optical switch by adjusting the readout beam polarization in volume grating [J]. *Opt. Commun.*, 2003, 217(1): 111-115.
- [14] 刘思敏. 光折变空间光孤子[J]. *物理*, 1995, 24(7): 408-412.
- LIU S M. Photorefractive spatial solitons [J]. *Physics*, 1995, 24(7): 408-412. (in Chinese)
- [15] LIANG B L, WANG ZH Q. Fidelity holographic recording in a Ce:KNSBN crystal with incoherent erasing technique[J]. *Optik*, 2003, 114(1), 515-514.
- [16] LI P L, GUO Q L, WANG ZH J, *et al.*. Beam fanning effect and holographic storage in Ce:KNSBN crystal [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(1):23-26.
- [17] STEPKEN A, KAISER F, BELIC M R. Anisotropic interaction of three-dimensional spatial screening solitons [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, 17(1): 68-77.
- [18] SEGEV M. Optical spatial solitons [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1999, 1(7-10): 503-533.
- [19] 王晓生, 余卫龙. 光折变空间孤子及其研究进展[J]. *中山大学学报*, 2001, 40(5):32-35.
- WANG X SH, SHE W L. Photorefractive spatial solitons and their research progress [J]. *Journal of Sun Yat-Sen University*, 2001, 40(5): 32-35. (in Chinese)
- [20] ZOZULYA A A, ANDERSON D Z, MAMAIEV A V, *et al.*. Solitary attractors and low-order filamentation in anisotropic self-focusing media [J]. *Phys. Rev.*, 1998, 57(A):522-534.
- [21] 张芳, 王正平, 许心光. SrWO₄ 晶体受激拉曼散射的各向异性[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 39-43.
- ZHANG F, WANG ZH P, XU X G. Anisotropy of stimulated Raman scattering in SrWO₄ crystal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 39-43. (in Chinese)
- [22] KROLIKOWSKI W, LUTHER-DAVIES B, DENZ C, *et al.*. Interaction of two dimensional spatial incoherent solitons in photorefractive medium[J]. *Appl. Phys.*, 1999, 68(B):975-982.
- [23] LIANG B L, GUO Q L, JIANG Y H, *et al.*. Energy transfer through vector-scalar photorefractive spatial soliton interaction[J]. *Appl. Phys. Express*, 2013, 6(6): 544-549.
- [24] SNYDER A W, KIVSHAR Y S. Bright spatial solitons in non-Kerr media: stationary beams and dynamical evolution [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, 14(4): 3025-3031.

[25] ZOZULYA A A, ANDERSON D Z, MAMAEV A V, *et al.*. Self-focusing and soliton formation in

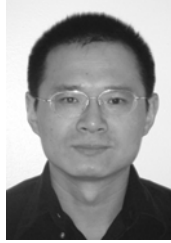
media with anisotropic nonlocal material response [J]. *Europhys. Lett.* 1996,36(6): 419-424.

作者简介:



王 颖(1977—),女,副教授,2003 年于河北大学获得硕士学位,主要从事光折变非线性光学和半导体纳米材料光学表征方面的研究。E-mail: hbuwangying@126.com

导师简介:



梁宝来(1971—),男,教授,2000 年于南开大学获得博士学位,主要从事半导体纳米功能材料的分子束外延制备、光学特性诊断、光折变非线性光学和光学信息处理等研究。E-mail: liangbaolai@gmail.com