

光折变空间孤子及其研究进展 (II)^{*}

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, 广东 广州 510275)

摘 要: 介绍了国内外有关光折变空间孤子, 特别是今年来部分空间非相干孤子, 全光准稳态孤子, 屏蔽光伏孤子, 复色光孤子, 非相干白光孤子及孤子对相互作用的研究进展, 最后, 对光折变空间孤子未来的研究作出展望.

关键词: 光折变空间孤子; 非线性光学; 进展

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 06-0016-04

近 10 年, 光折变空间孤子的研究一直是科学研究的热点及前沿. 现在已发现的光折变型空间孤子主要有 3 种基本的类型, 即屏蔽孤子^[1~20]、准稳态孤子^[21~29]、光伏孤子^[30~39].

随着理论及实验研究的深入, 部分空间非相干亮和暗孤子^[9, 11, 12, 37], 非相干白光孤子^[10], 全光准稳态孤子^[28], 全光双准稳态孤子^[29], 光伏—屏蔽孤子^[37], 光伏涡旋孤子^[24, 32, 34], 复色光光伏空间孤子^[36], 孤子对^[5, 6, 35], 孤子对碰撞及孤子间的相互作用^[14~20], 自发孤子^[38], 平面波导孤子^[17, 39]等相继被发现和报道.

每一项新发现和进展都很受重视, 国际上最具权威性的科学杂志如 Nature, Science, Physical Review Letters 等都相继报道有关的新发现和新进展. 下面就介绍国内外的研究进展, 并对以后的研究作出展望.

1 国内外研究工作进展

屏蔽孤子的理论分析及预言最先由 Segev 和 Valley 等在 1994 年作出^[37]. 实际上在此之前 (1994) Iturbe-Castillo 等已在实验上观察到了电场屏蔽下的自聚焦效应^[2].

1995 年 Christodoulides 等利用 Kukhtarev-Vinetskii 模型也从理论上导出了亮和暗孤子解^[3], 同年 Silgh 等对屏蔽孤子的稳定性作了理论分析^[37]. 次年 K. Kos 等用实验验证了一维屏蔽孤子理论^[4]. 1996 年 Segev 等发现在很高的光

强区域会形成空间电荷场为 $E \propto \frac{1}{(1+u^2)^{1/2}}$ 的

孤子(其中 $u^2 = \frac{I_s}{I_b}$), 在这种高光强下, 响应时间会变得很短, 可以达到 ns 的数量级^[1]. 这为高速光开关的应用提供了理论基础. 多个屏蔽孤子相互作用可形成屏蔽孤子对. 1996 年 Christodoulides 等在理论上预言了非相干孤子对^[37]; 同年, Chen 和 Segev 等相继报道了亮—亮非相干屏蔽孤子对^[5]及亮—暗非相干屏蔽孤子对^[9]. 他们在亮—暗孤子对的实验中还发现存在着高阶屏蔽孤子. 接着 (1996 年), Singh 等对高阶空间电荷场作出了分析^[7]. 同年, Shih 等发表了二维屏蔽孤子的实验结果^[8]; Mitchell 等报道了部分空间非相干屏蔽亮孤子的实验观察^[9]. 1997 年部分空间非相干屏蔽孤子的理论由 Christodoulides 等人作出^[37]. 同年, 非相干白光屏蔽孤子由 Mitchell 和 Segev 作出^[10]. 1998 年 Chen 等报道了部分空间非相干屏蔽暗孤子的实验观察^[11], Christodoulides 等则作出了非相干屏蔽暗孤子的理论^[14]. 1998 年 DelRe 等在有中心对称的晶体中首次实现了一维屏蔽孤子^[13]. 近几年来, 孤子相互作用的研究引起了人们的广泛兴趣并发展成了一个新的研究分支. 1996 年 Shih 等报道了非相干二维屏蔽亮孤子相互碰撞的实验观察^[14], 1997 年 Krolkowski 等则报道了相干光屏蔽孤子碰撞的实验结果^[14]. 同年, Garcia-Quirino 等研究了两束相干且平行的 He—Ne 光

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10074082); 教育部科学技术重点项目基金资助项目 (99197); 广东省自然科学基金资助项目 (001192)

收稿日期: 2001-04-23; 作者简介: 王晓生 (1977—), 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 余卫龙.

的相互作用^[15], 证明这种相互作用可以是吸引或排斥, 它取决于两束光的初相位; Shih 等人在实验中发现非相干的二维屏蔽孤子相互作用可以表现出螺旋前进的行为^[14]. 1998 年 Krolikowski 等观察到非相干屏蔽孤子的相互作用也表现出吸引和排斥行为^[16]. 1999 年 Krolikowski 等报道了两束非相干孤子相互碰撞引起的各自的波形发生变化的实验结果^[14]. 同年, Anastassiou 等在实验上研究了屏蔽涡旋孤子相互作用引起的能量交换^[14]; Kip 等则在平面波导上研究了屏蔽孤子的相互作用^[17]. 这一年, Stegeman 等在 Science 上发表了孤子相互作用的研究进展总结^[14]. 2000 年 Kivshar 等发表了暗涡旋孤子与暗条状孤子相互作用的实验结果^[18]; DelRe 等则报道了圆形亮孤子与条状亮孤子相互作用的实验结果^[19]. 同年, Coskum 等在理论上证明了一个非相干的暗孤子与一束部分非相干的亮光束相互作用, 可以使亮光束的强度分布变得尖锐^[20].

准稳态孤子是最早发现的光折变型空间孤子. 1992 年 Segev 等就从理论上预言了光波各平面波分量的二波耦合效应与衍射效应相抵消的准稳态亮孤子^[37]. 1993 年 Crosignani 等就怎样才能在非线性晶体中实现光折变空间孤子进行了分析^[21], 为在实验上实现光折变孤子作准备; Duree 等在实验上首次观察到了准稳态亮孤子^[22]. 1994 年 Christodoulides 等从理论上证明了在过聚焦情况下高斯光束可形成压缩及塌陷^[23]. 同年, Segev 等对准稳态孤子的稳定性作出了理论上的评价^[37]. 1995 年 Duree 等在实验上首次观察到了准稳态暗孤子及涡旋孤子^[24]. 同年, Morin 等报道了准稳态孤子的波导功能^[25]. 1996 年 Fresengeas 等对光折变空间孤子的时变行为进行了细致的理论分析并做了实验验证^[37]. 1998 年他们又报道了 1 维准稳态亮孤子的机制^[26], 实际上是从另一个角度出发建立了准稳态孤子理论. 1999 年, Maufroy 及 Fress 等又利用 Kukhtarev 带传输模型研究了 1 维准稳态孤子及其相关属性^[27]. 最近, 余卫龙等首次发现并报道了不需外加电场的全光准稳态孤子^[28], 全光双准稳态孤子^[29]的实验结果; 这种新的准稳态孤子有明显的全光开关效应. 全光准稳态特别是全光双准稳态孤子的理论尚未成熟, 有待于进一步研究.

光伏孤子的研究工作开始于 1994 年, Valley 等首先对光伏亮暗孤子作了理论上的分析^[37], 1995 年 Taya 等在实验上观察到了暗孤子^[30]. 1996 年他们利用暗孤子在光伏晶体中实现了 Y 形联结^[31], 为通信应用作好了准备. 1997 年, 光伏涡旋孤子由 Chen 等报道^[32]. 同年, Segev 等对光伏孤子作理论上的总结并分析了外电路开路及闭路情况下光伏孤子的差异及特性^[37]. 光伏亮孤子的理论很早就已经给出了, 但一直以来都未能在实验上实现, 直到 1999 年二维光伏亮孤子的实验观察才由余卫龙等首次给出^[33]. 2000 年, 凌振芳等对维持圆对称的光伏涡旋孤子作了分析^[34]. 在光伏晶体上外加电场可以形成屏蔽光伏孤子, 其理论分析^[37]由刘劲松和卢克清等作出 (1998, 1999 年). 2000 年, 刘劲松等对屏蔽—光伏孤子的稳定性进行了分析^[37], 随后, 侯春风等作出了非相干耦合屏蔽光伏孤子对的理论^[35]. 最近 (2001 年), 余卫龙等的研究发现, 背景光的光伏效应一般不可忽略. 他们提出了一个考虑了背景光光伏效应的光伏空间孤子理论. 在这个理论中空间电荷场形式变为 $E \propto (RI_b + I_s)/(I_s + I_b)$, R 为考虑了背景光光伏效应而引入的参数, 它等于背景光的有效 Glass 系数比上信号光的有效 Glass 系数. 如果忽略背景光的光伏效应, 则 $R = 0$, 就回到了以前的理论. 根据这个理论, 在 Δn 为正的晶体中可实现亮及暗孤子, 这打破了 Segev 等关于“在折射率改变为正的介质中只能产生亮孤子^[37]”的权威论断, 同时余卫龙等在考虑背景光光伏效应的情况下, 首次在 $\Delta n > 0$ 的晶体中获得了光伏暗孤子^[37], 证实了有关的理论. 同年, 复色光光伏空间孤子的理论及亮孤子的实验观察由我们小组作出^[36].

1999 年, DelRe 等在亚稳态的顺电相晶体中发现并报道了一种新的光折变空间亮孤子, 即所谓的自发孤子^[38]. 这是一种主要由光折变扩散场引起的光折变型空间孤子, 它可以是一维或二维的. 其形成不依赖于光强, 不需要背景光, 不需要外加电场也不需要晶体有强的光伏效应, 它只要求晶体温度必须使晶体处于顺电相. 其形成机制目前还不是很清楚. 另外, 人们还对平面波导中的光折变空间孤子^[17,39]进行了研究.

2 研究工作展望

由于光折变空间孤子的形成过程包含许多物

理效应^[14], 其机制比较复杂, 研究工作还有待深入. 今后的研究将会继续探讨其形成机制以进一步了解孤子的行为及特性, 同时寻找其他可能形成孤子的未知物理效应. 由于光折变效应依赖于电光效应, 所以可由外电路或外加电场控制孤子的形成. 光伏孤子的研究一般只考虑外电路开路或外加一个直流电场 (屏蔽—光伏孤子) 的情况, Segev 等考虑过外电路短路的情况, 但他们没有考虑背景光光伏效应的贡献. 我们最近的研究发现, 考虑了背景光光伏效应的贡献, 如果外加一个电阻使外电路形成回路, 在无需改变信号光、背景光光强及波长的情况下, 可以仅仅通过改变外电路的电阻大小来控制光伏孤子的孤子宽度, 甚至实现亮暗、暗亮孤子的转换. 这有待于实验的进一步验证. 有迹象表明, 在串接的光折变晶体中, 各个光折变孤子也会相互作用, 这是一个值得研究的有趣现象. 另外, 外加电场的复色光光伏空间孤子, 外加电场的部分空间非相干 (包括复色光) 孤子就很值得研究. 白光光伏空间孤子也是有意义的研究课题, 因为白光孤子的制备可能是一种获得白激光的腔外技术. 在折射率改变为正的光折变晶体中形成光伏暗孤子的理论和实验研究已有进展, 但在折射率改变为负的光折变晶体中形成光伏亮孤子的研究尚待进行, 尚有许多工作可作. 为向光开关等应用方向发展, 研究会着重于孤子的控制机制, 并向应用化发展. 孤子与孤子间的相互作用引起的能量交换及位相信息传输等的研究将会成为发展的重点. 上述的各种孤子之间的相互作用都值得研究, 其中非相干光孤子, 包括部分空间非相干光孤子的相互作用尤其应引起重视, 因为, 有用的全光开关都是在非相干光条件下运转的.

参考文献:

- [1] SEGEV M, SHIH M, VALLEY G C. Photorefractive screening solitons of high and low intensity[J]. J Opt Soc Am B 1996, 13(4): 706—718.
- [2] ITURBE CASTILLO M D, MARQUEZ P A, SANCHEZ—MONDRAGON J J, et al. Spatial soliton in photorefractive Bi₁₂TiO₂₀ with drift mechanism of nonlinearity[J]. Appl Phys Lett 1994, 64(4): 408—410.
- [3] CHRISTODOULIDES D N, CARVALHO M I. Bright, dark, and gray spatial soliton states in photorefractive media[J]. J Opt Soc Am. B 1995, 12(9): 1628—1633.
- [4] KOS K, MENG H, SALAMO G, et al. One-dimensional steady-state photorefractive screening soliton[J]. Phys Rev E, 1996, 53(5): R4330—4334.
- [5] CHEN Z, SEGEV M, COSKUN T H, et al. Observation of incoherently coupled photorefractive spatial soliton pairs[J]. Opt Lett, 1996, 21(18): 1436—1438.
- [6] CHEN Z, SEGEV M, COSKUN T H, et al. Incoherently coupled dark-bright photorefractive solitons[J]. Opt Lett 1996, 21(22): 1821—1823.
- [7] SINGH S R, CARVALHO M I, CHRISTODOULIDES D N. Higher-order space charge field effects on the evolution of spatial soliton in biased photorefractive crystals[J]. Opt Comm, 1996, 130: 288—294.
- [8] SHIH M, LEACH P, SEGEV M, et al. Two-dimensional steady-state photorefractive screening solitons [J]. Opt Lett, 1996 21(5): 324—326.
- [9] MITCHELL M, CHEN Z, SHIH M, et al. Self-trapping of partially spatially incoherent light[J]. Phys Rev Lett 1996, 77(3): 490—493.
- [10] MITCHELL M, SEGEV M. Self-trapping of incoherent white light[J]. Nature, 1997, 387: 880—883.
- [11] CHEN Z, MITCHELL M, SEGEV M, et al. Self-trapping of dark incoherent light beams[J]. Science, 1998, 280: 889—892.
- [12] CHRISTODOULIDES D N, COSKUN T H, MITCHELL M, et al. Theory of incoherent dark solitons[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(23): 5113—5116.
- [13] DELRE E, CROSIGNANI B, TAMBURRINI M, et al. One-dimensional steady-state photorefractive spatial solitons in centrosymmetric paraelectric potassium lithium tantalate niobate[J]. Opt Lett, 1998, 23(6): 421—423.
- [14] STEGEMAN G I, SEGEV M. Optical spatial solitons and their interactions: universality and diversity[J]. Science, 1999, 286: 1518—1523.
- [15] GARCIA—QUIRINO G S, ITURBE—CASTILLO M D, VYSLOUKH V A, et al. Observation of interaction forces between one-dimensional spatial solitons in photorefractive crystals[J]. Opt Lett, 1997, 22(3): 154—156.
- [16] KROLIKOWSKI W, SAFFMAN M, LUTHER—DAVIES B, et al. Anomalous interaction of spatial solitons in photorefractive media[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(15): 3240—3243.
- [17] KIP D, WESNER M, HERDEN C, et al. Interaction of spatial photorefractive solitons in planar waveguide [J]. Appl Phys B, 1999, 68: 971—974
- [18] KIVSHAR Y S, NEPOMNYASHCHY A, TIKHONENKO V, et al. Vortex-stripe soliton interactions [J]. Opt Lett, 2000, 25(2): 123—125.
- [19] DELRE E, TRILLO S, AGRANAT A J. Collisions and inhomogeneous forces between solitons of different dimensionality[J]. Opt Lett, 2000, 25(8): 560—562.
- [20] COSKUN T H, GRANDPIERRE A G, CHRISTODOULIDES D N, et al. Coherence enhancement of spatially incoherent light beams through

- solitons interactions[J]. Opt Lett, 2000, 25(11): 826—828.
- [21] CROSIGNANI B, SEGEV M, ENGIN D, et al. Self-trapping of optical beams in photorefractive media[J]. J Opt Soc Am B, 1993, 10(3): 446—453.
- [22] DUREE G C, Jr SHULTZ J L, et al. Observation of self trapping of an optical beam due to the photorefractive effect[J]. Phys Rev Lett, 1993, 71(4): 533—536.
- [23] CHRISTODOULIDES D N, CARVALHO M I. Compression, self-bending, and collapse of Gaussian beams in photorefractive crystals[J]. Opt Lett, 1994, 19(21): 1714—1716.
- [24] DUREE G, MORIN M, SALAMO G, et al. Dark photorefractive spatial solitons and photorefractive vortex solitons[J]. Phys Rev Lett, 1995, 74(11): 1978—1981.
- [25] MORIN M, DUREE G, SALAMO G, et al. Waveguides formed by quasi-steady-state photorefractive spatial solitons[J]. Opt Lett, 1995, 20(20): 2066—2068.
- [26] FRESSENGEAS N, WOLFERBERGER D, MAUFOY J, et al. Build up mechanisms of (1+1) dimensional photorefractive bright spatial quasi-steady-state and screening solitons[J]. Opt Comm, 1998, 145: 393—400.
- [27] MAUFOY J, FRESSENGEAS N, WOLFERSBERGER D, et al. Simulation of the temporal behavior of soliton propagation in photorefractive media[J]. Phys Rev E, 1999, 59(5): 6116—6121.
- [28] SHE W L, LEE K K, LEE W K. All optical quasi-steady state photorefractive spatial solitons[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(12): 2498—2501.
- [29] 余卫龙, 李荣基. 全光双准稳态空间孤子[J]. 物理学报, 2001, 50(5): 886—891.
- [30] TAYA M, BASHAW M C, FEJER M M, et al. Observation of dark photovoltaic spatial solitons[J]. Phys Rev A, 1995, 52(4): 3095—3100.
- [31] TAYA M, BASHAW M C, FEJER M M, et al. Y junction arising from dark soliton propagation in photovoltaic media[J]. Opt Lett, 1996, 21(13): 943—945.
- [32] CHEN Z, SEGEV M, WILSON D W, et al. Self-trapping of an optical vortex by use of the bulk photovoltaic effect[J]. Phys Rev Lett, 1997, 78(15): 2948—2951.
- [33] SHE W L, LEE K K, LEE W K. Observation of two-dimensional bright photovoltaic spatial solitons[J]. Phys Rev Lett, 1999, 83(16): 3182—3185.
- [34] 凌振芳, 郭儒, 刘思敏, 等. 光生伏打—光折变介质中光学涡旋孤子[J]. 物理学报, 2000, 49(3): 455—458.
- [35] 侯春风, 袁保红, 孙秀冬, 等. 非相干耦合屏蔽光伏孤子对[J]. 物理学报, 2000, 49(10): 1969—1972.
- [36] 王晓生, 何国岗, 余卫龙, 等. 复色光光伏空间孤子[J]. 物理学报, 2001, 50(3): 496—500.
- [37] 王晓生, 余卫龙. 光折变空间孤子及其研究进展 (I) [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2001, 40(5): 32—35.
- [38] DELRE E, TAMBURRINI M, SEGEV M, et al. spontaneous self-trapping of optical beams in metastable paraelectric crystals[J]. Phys Rev Lett, 1999, 83(10): 1954—1957.
- [39] KIP D, WESNER M, SHANDAROV V, et al. Observation of bright spatial photorefractive solitons in a planar strontium barium niobate waveguide[J]. Opt Lett, 1998, 23(12): 921—974.

The Progression of Photorefractive Spatial Soliton (II)

WANG Xiao sheng, SHE Wei long

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

Abstract: The progress on photorefractive spatial solitons, especially partially spatially incoherent solitons, all optical quasi-steady-state solitons, polychromatic photovoltaic spatial solitons, screen-photovoltaic solitons, incoherent white light solitons, interaction between solitons, is reviewed.

Keywords: photorefractive spatial soliton; nonlinear optics; progress