

光孤子研究的新进展*

陆 宏 徐建东 李淳飞 洪 晶
(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 简要介绍了时间光孤子和空间光孤子的研究现状, 侧重介绍了亮空间光孤子和暗空间光孤子的最新研究进展, 最后分析了光孤子研究的未来发展方向。

关键词: 时间光孤子 空间光孤子 亮空间光孤子 暗空间光孤子。

A new research advance on optical solitons

Lu Hong, Xu Jiandong, Li Chunfei, Hong Jing
(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: The paper gives a brief introduction of the situation of researches on time optical solitons and spatial optical solitons, and pays particular attention to introduce the new progress of the researches on bright spatial optical solitons and dark spatial optical solitons. At last, it analyses the next research orientation on optical solitons.

Key words: time optical soliton spatial optical soliton bright spatical optical soliton dark spatical optical soliton

一、引 言

光孤子的研究对全光通讯技术和光子器件的发展具有重要的实际意义, 所以近年来吸引了国内外众多的专家学者。孤子现象是英国造船师 Scott. Russell 于 1834 年在水渠中首次发现的, 1895 年 Korteweg 和 De Vries 提出第一个孤子数学模型方程——kdv 方程^[1]。1973 年 A. Hasegawa 和 F. Tappert 预言, 光纤中存在光脉冲形式的光孤子, 这种光脉冲具有不扩散性, 即无色散的优点, 预示光孤子光纤通讯可以突破传统光纤通讯因色散效应而产生的理论极限^[2]。从此, 光孤子的研究蓬勃发展起来。

二、时间光孤子的研究进展

A. Hasegawa 和 F. Tappert 预言的在光纤中传播的光脉冲实际上就是时间光孤子, 可以由下面的方程描述:

$$i \frac{\partial A}{\partial Z} = -\frac{i}{2} \alpha A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \partial |A|^2 A \quad (1)$$

式中, $A(z, t)$ 为脉冲包络振幅, $T = t - z/v_g$ 为内禀坐标系(即以群速 v_g 运动的坐标系)中的时间。方程(1)右端第一项描述光纤的线性损耗, 第二项描述光纤的群速色散(GVD), 第三项描述光纤的自相位调制(SPM)效应。当 GVD 不足以平衡 SPM 时, 光脉冲中部会形成“红头紫尾”的啁啾, 如图 1; 只有当 GVD 基本平衡 SPM 时, 光纤中才能存在稳定的时间光孤子, 如图 2^[3]。

由于稳定的时间光孤子的形成需要很高的实验条件和技术, 直到 1980 年才由 Mollenauer

* 哈尔滨工业大学校基金资助。

等人首次在 Bell 实验室观察到^[4]; 1984 年 Mollenauer 等人又成功地研制了色心孤子激光器^[5]; 1991 年 Smith 等人研制成功全光纤集成的掺铒光纤孤子激光器^[6]; 1991 年 Mollenauer 等人利用周期性掺铒光纤放大成功地实现了 12000km 距离上孤子的传输^[7]。这预示着时间光孤子的研究正走向成熟, 美国和日本都在着手研制基于时间光孤子的全光器件, 可以预期, 时间光孤子的实用化已经不是渺茫的事情了。

在我国, 叶培大院士领导的研究小组很早就开展了时间光孤子的研究, 目前清华大学、中国科技大学、华南师大、上海交大、东南大学、西安光机所等单位都积极开展时间光孤子光纤通讯的探索性研究。

三、亮空间光孤子的研究进展

和时间光孤子相比, 空间光孤子的研究高潮出现较晚, 现在国际上对空间光孤子的研究方兴未艾。

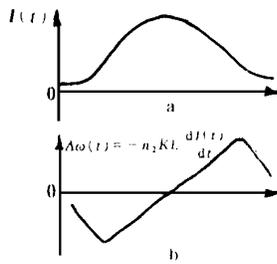


Fig. 1 Optical pulse (a) and its frequency chirp (b)

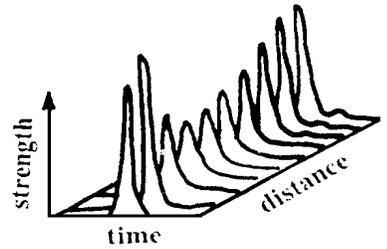


Fig. 2 Evolution of the base pulse with weaker chirp

在我国, 叶培大院士领导的研究小组很早就开展了时间光孤子的研究, 目前清华大学、中国科技大学、华南师大、上海交大、东南大学、西安光机所等单位都积极开展时间光孤子光纤通讯的探索性研究。

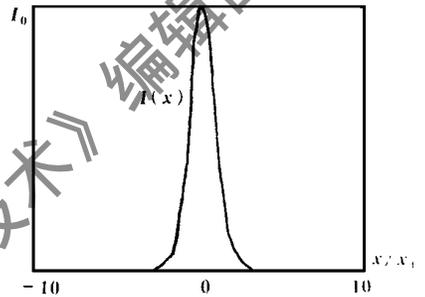


Fig. 3 Intensity of bright spatial optical soliton

空间光孤子按其光强分布可以分为亮空间光孤子和暗空间光孤子, 如图 3 和图 4 所示。

1964 年 R. Y. Chiao 等人就开始了自聚焦方面的研究^[8], 但是直到 1972 年 V. Z. Zakharov 和 Shabat 给出了非线性薛定谔方程(NLS)的孤子理论^[9]后人们才认识到自聚焦丝就是一种亮空间光孤子。

忽略介质损耗, 空间光孤子传播的 NLS 方程为:

$$i(\partial \varepsilon / \partial \xi) + (\partial^2 \varepsilon / \partial \zeta^2) - 2|\varepsilon|^2 \varepsilon = 0 \quad (2)$$

式中, $\varepsilon = E/E_0$ 为归一化场振幅, $\xi = z/z_0$ 为归一化纵向坐标, $\zeta = x/x_0$ 为归一化横向坐标。这里

E_0 为场的最大振幅, $z_0 = 2n_0 / (\beta \cdot |n_2| \cdot |E_0|^2)$ 为孤子传播的特征尺度, $x_0 = n_0^{1/2} / (\beta \cdot |n_2|)^{1/2} \cdot |E_0|$ 为孤子宽度的特征尺度, n_0 为线性折射率, β 为光在介质中的传播常数, n_2 为非线性折射率。

亮空间光孤子的光场能量主要集中在空间的一个窄域中, 数学上对应于方程(2)在取无穷远处光强为零的边界条件下得到的解。亮空间光孤子可以存在于自聚焦的 Kerr 型光学非线性

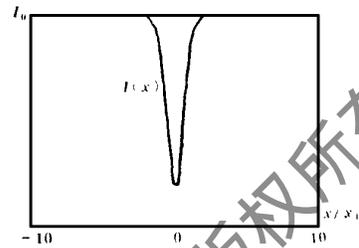


Fig. 4 Intensity of dark spatial optical soliton

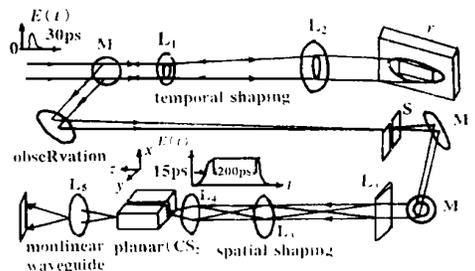


Fig. 5 Experimental setup of S. Maneuf et al

亮空间光孤子可以存在于自聚焦的 Kerr 型光学非线性

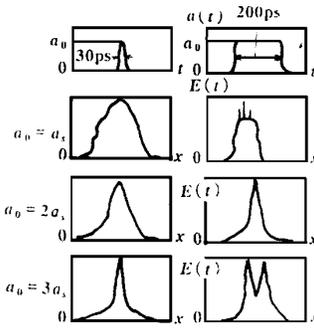


Fig. 6 Experimental results of bright spatial solitons, after S. Maneuf et al

角度出发, 实验证明了在 Kerr 介质中光束的衍射和自聚焦效应可以平衡, 光束能够无发散地以亮空间光孤子的形式传播^[10], 从而掀起了空间光孤子的研究热潮。1988 年 S. Maneuf 等人在 KDP

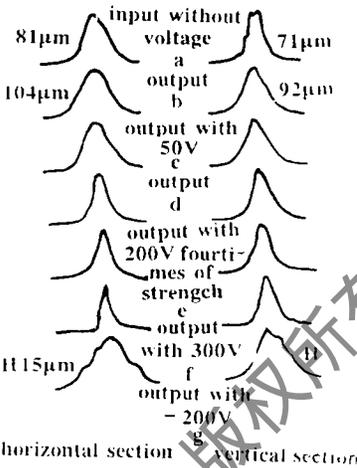


Fig. 9 Results under different voltages

各种外加电压下, 光束水平和垂直断面的观察结果如图 9 所示, 外加电压为 200V ($E_0 = 400V/m$) 时晶体中的空间光束断面如图 10^[13]。

有关亮空间光孤子的研究目前主要集中在光折变晶体中的孤子现象, 我国的山东大学晶体所和西安交大的研究小组都积极投入这方面的研究工作。这个领域的研究无疑将对光学信息处理技术的发展起到巨大的推动作用。

四、暗空间光孤子的研究进展

在亮空间光孤子的研究迅速开展的同时, 暗空间光孤子技术也悄悄发展起来。1987 年 Pierre-Andre Belanger 和 Pieree Mathieu 第一次从自散焦的 Kerr 型非线性介质中光场的 NLS 方程出发, 证明了在自散焦的 Kerr 介质中可能存在 TE 模线偏振的 (1+1) 维暗空间光孤

性介质之中, 在光强的传播过程中表现出光束横向尺度的不扩散性, 即衍射与自聚焦平衡, 亦即光束自我束缚自我导引, 故有时又称为光束的自陷效应。

1985 年

A. Barthelemy 等人第一次从亮空间光孤子

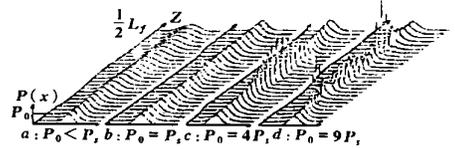


Fig. 7 Numerical results of bright spatial solitons after S. Maneuf et al

晶体中观察到了基阶、二阶、三阶亮空间光孤子, 其实验

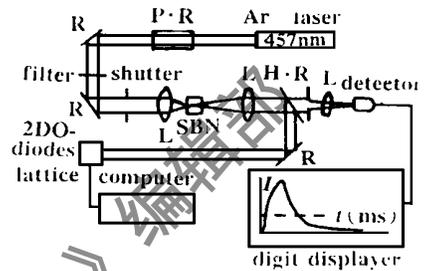


Fig. 8 Experimental setup for G.C. Duree

晶体中观察到了基阶、二阶、三阶亮空间光孤子, 其实验

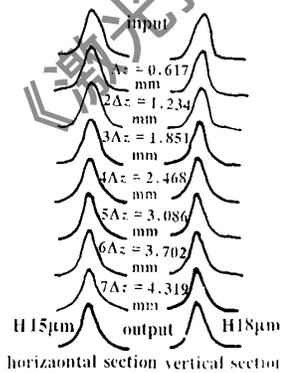


Fig. 10 Results under the voltage being 200V

如图 5 布局, 实验结果见图 6, 数值模拟结果见图 7^[11]。1993 年 G. Khitrova 等人在半导体材料中也观察到亮空间光孤子^[12]; 同年 G. C. Duree 等人在光折变晶体中, 在光强很低的情况下观察到亮空间光孤子, 其实验布置如图 8 所示, 在各

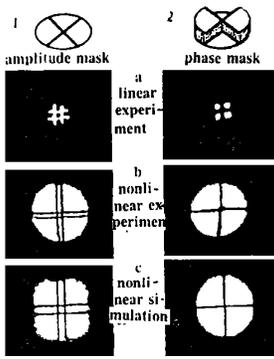


Fig. 11 Results of dark spatial solitons after G. A. Swartzlander et al

子^[14],并试着用它定性地解释了1986年Jerominek等人在Ti:LiNbO₃波导中观察到的光束分支效应^[15]。1991年G. A. Swartzlander等人在Na蒸汽中用连续激光第一次观察到了以暗带和暗网格形式存在的(1+1)维暗空间光孤子^[16],通过对暗空间光孤子的远场、近场衍射图案的数值模拟,强有力地证明了所观察到的暗结构确是暗空间光孤子现象,图11是他们得到的暗空间光孤子的近场衍射图案。1991年,G. R. Allan等人利用皮秒光脉冲在半导体材料ZnSe中观察到了基阶和非基阶的暗空间光孤子^[17,18]。现在观察到暗空间光孤子的非线性光学介质还有叶绿素丙酮溶液、视紫红酯等^[19,20]。

与实验相比,暗空间光孤子理论发展更为迅速,H. T. Tran采用线性分析的方法分析了(1+1)维暗空间光孤子的稳定性^[21];G. S. McDonald等用数值计算方法分析了准(1+1)维暗空间光孤子的三维不稳定性^[22],并发现(1+1)维暗空间光孤子向相位奇点演变的现象;Yijiang Chen和Javid Atai分析了介质吸收和增益对TE模暗空间光孤子的影响^[23];Wislaw Krolkons则考虑了饱和非线性对暗空间光孤子的影响^[24]。

其他有关暗空间光孤子的研究成果有:1991年Yijiang Chen在研究TM模电场方程时,发现暗空间光孤子解^[25];M. Haelterman和A. P. Sheppard从与光的偏振状态有关的线性双折射和非线性的交叉相位调制效应的介质模型出发,得到了一个耦合的NLS方程组^[26],这个方程组的暗空间光孤子解虽然也是暗带状的,但是其中的渐变光场并不是单纯的线偏振光,在靠近暗带两个边缘处光场为圆偏振光或椭圆偏振光,在暗带中心处两者渐变为方向一致的线偏振光,这两种结构类似于磁畴壁,因而称这种光孤子为偏振畴壁型暗空间光孤子;K. Hayata和M. Koshiba在理论上发现,二阶非线性材料中,在二次谐波的相对介电常数小于基波的相对介电常数的情况下,可以利用由基波和二次谐波间相互支持的参量相互作用过程,来产生一种新的暗空间光孤子,如图12所示^[27];在圆对称的条件下,光场中也可以存在一种形式稳定的暗空间光孤子,这就是(2+1)维NLS方程的孤子解,对此,G. A. Swartzlander等人已经做了实验验证,并称这种光孤子为涡旋型暗空间光孤子。

在我国,有关暗空间光孤子的研究是在最近两三年才开始的,其中哈尔滨工业大学的研究小组细致地研究了C₆₀甲苯溶液中的暗空间光孤子现象。上海交通大学的研究小组则成功地在染料中观察到了暗空间光孤子,中国科技大学的研究小组用量子光学方法计算了暗空间光孤子的态函数。

五、光孤子的未来研究设想

综上所述,有关光孤子的研究无论在理论上还是在实验上均已取得了一定的成果,未来的

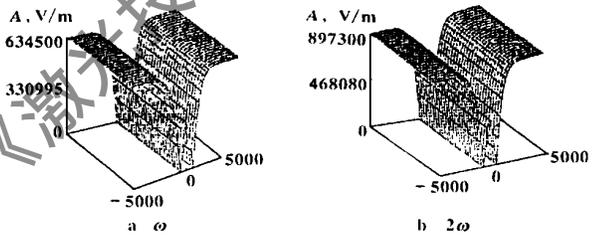


Fig. 12 Dark spatial optical soliton in the second order nonlinear optical medium

研究方面应该如何呢? 笔者根据我们数年的研究经验做如下设想:

1. 光孤子的应用

时间光孤子的应用主要在于全光通讯技术, 其核心内容是孤子的传输和孤子激光器的研制。空间光孤子的应用主要在于研制全光的光子器件, 如可控的柔性波导^[28], X, Y 方向耦合器(见图 13 和图 14)^[29], 光开关, 光放大器以及光束扫描器等^[30]。这方面的研究尚不成熟, 还未达到实用化阶段, 由于研究条件较高, 中国学者

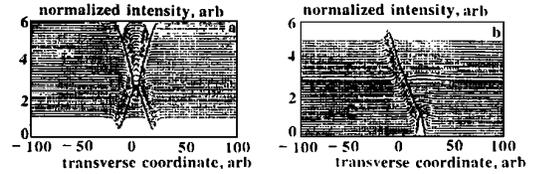


Fig. 13 X-coupler in the course of collision of two dark spatial optical solitons
a—the optical strength of the two dark spatial optical solitons to collide b—the optical strength of the beam led by X-coupler

在这方面的研究需要克服很多困难, 但并非做不了, 如哈尔滨工业大学的研究小组成功地实现了可控的柔性波导。

2. 手性介质中的光孤子研究

目前国际光学界的另一个热点问题是有关手性介质的研究。所谓手性介质是一种旋光介质, 这种新型材料具有许多好的线性和非线性, 我们认为在这种介质中同样能存在光孤子现象。

3. 基于热致非线性的光孤子的研究

传统的光孤子现象一般是基于 Kerr 效应的, 但是哈尔滨工业大学的研究小组成功地实现了基于热致非线性的光孤子实验, 这方面的研究有助于揭示光孤子激发的条件。

4. 量子孤子态的研究

目前国际上有许多量子孤子态的研究成果见诸报道, 国内中国科技大学的研究小组和哈尔滨工业大学的研究小组也在这方面做了大量工作, 这些研究有助于揭示孤子的本质图象。

总之, 光孤子的研究充满了魅力, 有志科学研究者将会在其中发现广阔天地。

参 考 文 献

- 1 谷超豪主编. 孤子理论与应用. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1990
- 1 Hasegawa A, Tappert F. A P L, 1973; 23(4): 171
- 3 翟华金, 李宝其. 物理, 1993; 22(10): 630
- 4 Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Phys Rev Lett, 1980; 45(13): 1095
- 5 Mollenauer L F. Opt Lett, 1984; 9: 13
- 6 Smith K. Electron Lett, 1991; 27: 244
- 7 Mollenauer L F. Electron Lett, 1991; 27: 178
- 8 Soto-Crespo J M. Opt Commun, 1990; 101(3, 4): 223
- 9 Maneuf S, Reynaud F. Opt Commun, 1988; 66(5, 6): 325
- 10 Barthelemy A, Maneuf S, Frochly C. Opt Commun, 1985; 55: 201
- 11 Maneuf S, Desailly R, Frochly C. Opt Commun, 1988; 65: 193
- 12 Khitrova G, Gibbs H M, Kawamun Y *et al.* Phys Rev(A), 1993; 70(7): 920
- 13 Duree Jr G C, Shultz J L, Salamo G J *et al.* Phys Rev Lett, 1993; 71(4): 533

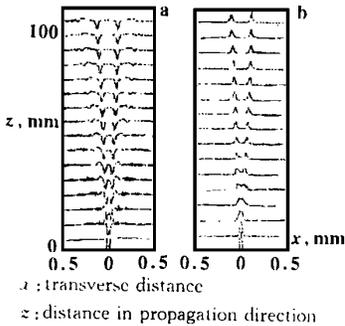


Fig. 14 Y-coupler of dark spatial optical solitons
a—a pair of dark spatial optical solitons b—the beam led by Y-coupler
x: transverse distance
z: distance in propagation direction

光孤子传输的能量、动量特性研究

沈廷根

(镇江师专物理系, 镇江, 212003)

摘要: 求解了含高阶效应的孤波方程, 由此孤子解得到光孤子的能量、动量表达式, 并讨论了高阶效应对孤子通信的综合影响。

关键词: 高阶效应 光孤子通信

Energy and momentum property in soliton propagating

Shen Tinggen

(Department of Physics, Zhenjiang Normal College, Zhenjiang, 212003)

Abstract: This paper deals with the problem of solving the soliton wave equation with higher-order effect. According to the solution of the soliton wave equation, the expressions of soliton energy and soliton momentum has been obtained. Finally, the influence of the higher-order effects on the soliton communication is discussed.

Key words: higher order effect soliton communications

一、引言

光孤子是在一定的介质中传播过程中保持自身形态不变的定域化的波, 即能量被集中在

- 14 Belanger P A, Mathieu P. *Appl Opt*, 1987; 26(1): 111
- 15 Jerominek H, Delise C, Tremblay R. *Appl Opt*, 1986; 25(5): 732
- 16 Swartzlander Jr G A, Andsen D R, Regan J J *et al.* *Phys Rev Lett*, 1991; 66(12): 1583
- 17 Allan G R, Skinner S R, Andsen D R *et al.* *Opt Lett*, 1991; 16(3): 156
- 18 Skinner S R, Allan G R, Andsen D R *et al.* *IEEE J Q E*, 1991; 27(9): 2214
- 19 Andersen D R. *Opt Lett*, 1990; 15(14): 783
- 20 Ramanujam P S. *Appl Opt*, 1993; 32(33): 6656
- 21 Tran H T. *Phys Rev(A)*, 1992; 46(11): 7319
- 22 McDonald G S, Syed K S, Firth W J. *Opt Commun*, 1993; 95(4, 5, 6): 281
- 23 Chen Y J, Attai J. *Opt Lett*, 1991; 16(24): 1933
- 24 Krolkowski W, Luther-Davies B. *Opt Lett*, 1993; 18(3): 188
- 25 Chen Y J. *Phys Rev(A)*, 1991; 44(11): 7524
- 26 Haelteman M, Sheppard S P. *Opt Lett*, 1994; 19(2): 96
- 27 Hayata K, Kosshiba M. *Phys Rev(A)*, 1994; 50(1): 675
- 28 Bosshard C, Mamyshev P V, Stegeman G I. *Opt Lett*, 1994; 19(2): 90
- 29 Sheppard A P. *Opt Commun*, 1993; 102(3, 4): 317
- 30 Hernandez-Figueroa H E, Pasquale F D, Ettinger R D *et al.* *Opt Lett*, 1994; 19(5): 326

* * *

作者简介: 陆宏, 男, 1967年3月出生。讲师, 博士研究生。主要从事非线性光学、激光技术、CAI技术的研究工作。