

光折变空间光孤子的研究进展*

侯春风 袁保红 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 对光折变空间光孤子的物理机理及研究进展进行了概括介绍, 并对它们的应用前景进行了展望。

关键词: 光折变 空间光孤子 自陷

Research progress of photorefractive spatial optical soliton

Hou Chunfeng, Yuan Baohong, Xu Kebin

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: In this paper, the physical mechanism and research progress of photorefractive spatial optical solitons are introduced summarily, and the applied prospects of photorefractive spatial optical solitons are also forecasted.

Key words: photorefractive spatial optical soliton self-trapping

引 言

1834 年, 英国的 Russell S 在运河中首次发现了“孤立波”现象。1895 年, 丹麦的 Korteweg 和 de Vries 推导出了著名的 KdV 方程, 解释了 Russell 看到的现象。1965 年, Zabusky 和 Kruskal^[1]发现这种孤立波的行为类似于粒子, 因此, 将其命名为“孤子(soliton)”。孤子概念被提出来以后, 人们对它开展了大量的研究工作, 孤子概念及理论被推广到许多不同的学科领域。光孤子是由 Hasegawa 和 Tappert^[2]于 1973 年所预言的, 并于 1980 年被 Mollenauer^[3]等人首次在实验中观测到。Hasegawa 和 Tappert 所预言的光纤中的光孤子实际上是时间光孤子, 目前, 对它的研究已日趋完善并逐渐向实用化方向发展。近年来, 人们开始对空间光孤子产生了浓厚的兴趣, 掀起了一场空间光孤子的研究热潮。笔者将着重介绍一种备受关注的空间光孤子——光折变空间光孤子的研究概况。

1 光折变空间光孤子的物理机理

1992 年, Segev 等人^[4,5]最先从理论上分析了在一定外加电场的作用下, 光折变材料中光束自陷的可能性, 预言了光折变空间光孤子的存在。空间光孤子是指在介质中无衍射地传播的光束, 一束光在介质中传播, 当其衍射作用被介质的非线性折射率改变所引起的限制作用所平衡时, 就会因自陷作用而形成空间光孤子。空间光孤子最早是在克尔和类克尔介质中被发现的, 而光折变空间光孤子的研究直到 90 年代才被人们开展起来。

光折变材料内部存在有杂质原子, 在光的照射下杂质可提供自由电荷, 这些自由电荷随着

光强的空间分布而重新分布,进而产生空间电荷场,空间电荷场通过线性电光效应使材料的折射率发生相应的变化。入射到光折变材料中的激光束的傅里叶变换空间频谱中的每一对平面波分量彼此相干,在材料中将产生干涉条纹,通过光折变效应使折射率发生调制,使折射率的空间分布为 $n(\vec{r}, z) = n_1 + \Delta n(\vec{r}, z)$, 此时光波满足如下方程:

$$[\partial/\partial z - i\nabla_r^2/(2k)]A(\vec{r}, z) = ik\Delta n(\vec{r}, z)A(\vec{r}, z)/n_1$$

式中, z 轴沿入射光束的传播方向, \vec{r} 是位于垂直于 z 轴平面内的矢量, $\nabla_r^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$, n_1 为无光照时的折射率,即基本折射率, $\Delta n(\vec{r}, z)$ 为入射光束引起的折射率扰动(折射率光栅)。由于光束的衍射作用关于 z 轴是对称的,因此对于所有的 z ,若折射率光栅具有空间对称性,即 $\Delta n(\vec{r}, z) = \Delta n(-\vec{r}, z)$,则材料中就会有—个对称的空间孤子波 $A(\vec{r}, z) = A(-\vec{r}, z)$ 形成。

2 光折变相干空间光孤子的研究进展

1993年, Duree 等人^[6]首次在掺杂 SBN 晶体中观察到了光折变空间光孤子。他们的实验光路如图 1 所示,其中,所用的光折变材料是尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 6\text{mm}$, 掺杂浓度为 $0.01\text{wt}\%$

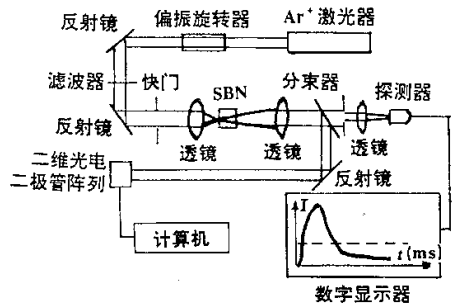


图 1 Duree 观测光折变空间光孤子的实验装置

的 SBN 晶体,光源采用波长为 457nm 的氩离子激光器。入射激光(直径 1.5mm , 功率 $10\mu\text{W}$)以异常偏振方向经聚焦透镜会聚后沿晶体 6mm 长的边的方向射入晶体,晶体上施加有沿光轴方向的直流电场,通过改变直流电压的大小可以控制晶体内光束的自聚焦程度,进而控制空间光孤子的形成。位于晶体后面的成像透镜可把晶体内的光束断面成像在二维光电二极管探测阵列上,前后移动成像透镜及光电二极管探测阵列,可探测出晶体内不同位置处光束断面的尺寸,进而检测是否形成了空间光孤子。实验结果显示,在适当的外加电压下,在晶体入射面、出射面及晶体内部不同断面处光束直径的大小基本维持不变,因此,可以认为形成了空间光孤子。

Duree 等人发现的光折变空间光孤子是准稳态(或瞬态)空间光孤子,准稳态(瞬态)空间光孤子^[4~11]是人们最先发现的光折变空间光孤子,它要求有外加电场,并且只存在于外加电场被材料内部空间电荷场缓慢地屏蔽掉的那段时间之内,随后稳态消失。这种空间光孤子的横向尺寸只依赖于入射光束的横向尺寸,而不依赖于入射光束的绝对光强,在微瓦的入射功率下即可产生。

1994年, Iturbe-Castillo 等^[12]报道了在加有外电场的光折变介质中的稳态自聚焦效应。同年, Segev 等^[13]从理论上预言了第二种光折变空间光孤子——屏蔽型空间光孤子。随后,人们在实验中观察到了这种光孤子^[14,15]。屏蔽型空间光孤子^[12~18]是一种稳态光孤子,它的产生也需要有外加电场。当一束激光纵向射入加有横向电压的光折变材料时,在材料内部光照区将产生光激发电荷,这些电荷经迁移并最终被俘获,这样,在材料内部就会产生不均匀的空间屏蔽电场,屏蔽掉一部分外电场,于是高光强区电场降低。电场通过线性电光效应使材料的折射率发生变化,如果折射率变化量 $\Delta n < 0$,则亮区折射率降低得少,而暗区折射率降低得多,由此在材料中形成一个梯度波导,使光束自陷,进而形成空间光孤子。对于屏蔽型空间光孤子, Δn 与光强的关系为 $\Delta n \propto 1/(I + I_d)$, 其中 I 为入射光强, I_d 为暗辐射强度。

1994 年,Valley 等^[19]预言了光伏空间光孤子,一年以后,人们发现了这种光折变空间光孤子。光伏空间光孤子^[19~21]是在块状光折变材料的光生伏打内电场的作用下产生的。当一束光射入光折变材料时,材料内部会产生很强的光生伏打内电场,该电场通过线性光电效应使光照区折射率发生变化,产生透镜效应,使光束发生自陷,进而形成稳定的空间光孤子。对于光伏空间光孤子,介质折射率变化量与光强的关系为 $\Delta n \propto I/(I + I_d) = (I/I_d)[1 + (I/I_d)]$ 。

1996 年,Chauvet 等^[22]在半导体磷化铟中发现了第 4 种光折变空间光孤子。半导体光折变材料中形成空间光孤子时,其内部由电子和空穴共同产生空间电荷场。1997 年,Segev 等^[23,24]预言并证实了中心对称光折变材料中的空间光孤子。形成这种空间光孤子时,材料的折射率变化量反比于入射光强与暗辐射强度之和的平方,即 $\Delta n \propto 1/(I + I_d)^2$ 。

上述各种光折变空间光孤子都是在相干光入射的条件下产生的。近年来,光孤子的研究呈现出向非相干光孤子方向发展的趋势。

3 光折变非相干空间光孤子的研究进展

1995 年以前,所有的光孤子实验都是利用相干光完成的。1996 年,Mitchell 等^[25]首次实现了准单色空间部分非相干光束的自陷。在他们的实验中,入射激光在射入光折变晶体之前先穿过一个旋转漫射器,旋转漫射器在光束断面处每微秒引入一次随机相位分布,当这束光射入响应较慢的光折变晶体时,在适当的条件下就会自陷成一条细丝。1997 年,Christodoulides 等^[26~28]建立了非相干光孤子理论,对非相干光束的自陷作用作出了解释。

1997 年,Mitchell 和 Segev^[29]利用波长范围为 380~720nm 的白炽灯泡作为光源,在 SBN 光折变晶体中首次实现了非相干白光——时间和空间都不相干的光束的自陷。1998 年,Chen 等^[30]观察到了非相干暗光束——嵌入一维暗带或二维暗缺的空间非相干光束的自陷,证实了非相干暗空间光孤子的存在。光折变非相干空间光孤子是一个非常令人感兴趣的课题,这方面的理论及实验研究为实现非相干光束对相干光束的控制提供了可能性,因而具有十分重要的意义。

4 光折变空间光孤子碰撞的研究进展

因光孤子之间的相互作用与粒子之间的相互作用非常相似,故在光折变空间光孤子的所有特性中,最令人感兴趣的就是光孤子之间的相互作用或称光孤子碰撞。近来,人们对光折变空间光孤子碰撞过程中产生的光孤子融合、分裂及湮灭等现象正在开展积极而广泛的研究。

1997 年,Garcia-Quirino 等^[31]研究了 $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ 光折变晶体中平行传播的相干空间光孤子之间的相互作用。实验表明,当初相位相同时,两孤子将相互吸引,而当初相位相反时,两孤子将相互排斥。同年,Krolikowski 等^[32,33]利用氩离子激光作光源,研究了 SBN 晶体中屏蔽光孤子之间的碰撞。实验结果显示,在不同的相对位相及传播交角下,光折变空间光孤子在碰撞过程中会产生能量交换、孤子融合及孤子增殖等效应。

1998 年,Mamaev 等^[34]利用 He-Ne 激光作光源,通过实验观察了 SBN 晶体中光孤子的相干碰撞过程。他们发现,当光束交角大致小于光束的特征衍射角时,两束光将融合到一起,即发生光孤子融合现象,而当两光束的交角较大时,两个光孤子将保持分立传播状态。1998 年,Krolikowski 等^[35]研究了光折变晶体中的多孤子碰撞现象。他们在实验中发现,在合适的初始相对位相下,当多个光孤子同时发生碰撞时会出现光孤子的湮灭现象。

5 应用前景展望

光折变空间光孤子的产生一般与入射光强无关,对入射光强没有明显的阈值要求,在微瓦的入射功率下即可产生,这使它在很宽的入射功率范围内均可得以应用。在光折变材料中形成空间光孤子的同时,便在材料中形成并存储了波导,该波导可以无损耗地传输光束。当多个光折变空间光孤子碰撞湮灭时,还可以在光折变晶体中形成并存储多端口波导结。光折变空间光孤子的这些性质可用于集成光学元件之间的联接及信息传递等方面,利用光折变非相干光孤子形成的波导,还可以实现用低功率非相干光对高功率相干激光的控制。另外,通过改变外加电场的极性、晶体取向或入射光的偏振方向,可以人为地改变光折变材料折射率变化量 Δn 的符号,进而实现光折变空间光孤子由亮孤子向暗孤子或由暗孤子向亮孤子的相互转化,利用光折变空间光孤子的这个性质可制成光学开关、光学双稳器及光学逻辑门等器件。综上所述,光折变空间光孤子在光学信息处理、集成光学、光学双稳、光存储、光互联及光计算等诸多方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Zabusky N J, Kruskal M D. *Phys Rev Lett*, 1965, 15(6): 240 ~ 243
- Hasegawa A, Tappert F. A P L, 1973, 23(4): 171 ~ 172
- Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. *Phys Rev Lett*, 1980, 45(13): 1095 ~ 1098
- Segev M, Crosignani B, Yariv A *et al.* *Phys Rev Lett*, 1992, 68(7): 923 ~ 926
- Crosignani B, Segev M, Engin D *et al.* *J O S A*, 1993, B10(3): 446 ~ 453
- Duree G C, Shultz J L, Salamo G J *et al.* *Phys Rev Lett*, 1993, 71(4): 533 ~ 536
- Duree G C, Salamo G J, Segev M *et al.* *Opt Lett*, 1994, 19(16): 1195 ~ 1197
- Segev M, Yariv A, Crosignani B *et al.* *Opt Lett*, 1994, 19(17): 1296 ~ 1298
- Christodoulides D N, Carvalho M I. *Opt Lett*, 1994, 19(21): 1714 ~ 1716
- Duree G C, Morin M, Salamo G J *et al.* *Phys Rev Lett*, 1995, 74(11): 1978 ~ 1981
- Morin M, Duree G C, Salamo G J *et al.* *Opt Lett*, 1995, 20(20): 2066 ~ 2068
- Iturbe-Castillo M D, Marquez-Aguilar P A, Sanchez-Mondragon J J *et al.* A P L, 1994, 64(4): 408 ~ 410
- Segev M, Valley G C, Crosignani B *et al.* *Phys Rev Lett*, 1994, 73(24): 3211 ~ 3214
- Shih M, Segev M, Valley G C *et al.* *Electron Lett*, 1995, 31(10): 826 ~ 827
- Shih M, Leach P, Segev M *et al.* *Opt Lett*, 1996, 21(5): 324 ~ 326
- Christodoulides D N, Carvalho M I. *J O S A*, 1995, B12(9): 1628 ~ 1633
- Singh S R, Christodoulides D N. *Opt Commun*, 1995, 118(5/6): 569 ~ 576
- Segev M, Shih M, Valley G C. *J O S A*, 1996, B13(4): 706 ~ 718
- Valley G C, Segev M, Crosignani B *et al.* *Phys Rev A*, 1994, 50(6): R4457 ~ 4460
- Taya M, Bashaw M, Fejer M *et al.* *Phys Rev A*, 1995, 52(4): 3095 ~ 3100
- Segev M, Valley G C, Bashaw M C *et al.* *J O S A*, 1997, B14(7): 1772 ~ 1781
- Chauvet M, Hawkins S A, Salamo G J *et al.* *Opt Lett*, 1996, 21(17): 1333 ~ 1335
- Segev M, Agranat A J. *Opt Lett*, 1997, 22(17): 1299 ~ 1301
- DelRe E, Crosignani B, Tamburrini M *et al.* *Opt Lett*, 1998, 23(6): 421 ~ 423
- Mitchell M, Chen Z, Shih M *et al.* *Phys Rev Lett*, 1996, 77(3): 490 ~ 493
- Christodoulides D N, Coskun T H, Mitchell M *et al.* *Phys Rev Lett*, 1997, 78(4): 646 ~ 649
- Mitchell M, Segev M, Coskun T H *et al.* *Phys Rev Lett*, 1997, 79(24): 4990 ~ 4993
- Coskun T H, Christodoulides D N, Mitchell M *et al.* *Opt Lett*, 1998, 23(6): 418 ~ 420
- Mitchell M, Segev M. *Nature*, 1997, 387(6636): 880 ~ 883
- Chen Z, Mitchell M, Segev M *et al.* *Science*, 1998, 280(5365): 889 ~ 892
- Garcia-Quirino G S, Iturbe-Castillo M D, Vysloukh V A *et al.* *Opt Lett*, 1997, 22(3): 154 ~ 156
- Krolikowski W, Holmstrom S A. *Opt Lett*, 1997, 22(6): 369 ~ 371

- 33 Meng H ,Salamo G ,Shih M *et al* .Opt Lett ,1997 ,22(7) :448 ~ 450
- 34 Mamaev A V ,Saffman M ,Zozulya A A .J O S A(B) ,1998 ;15(7) :2079 ~ 2082
- 35 Krolkowski W ,Luther-Davies B ,Denz C *et al* .Opt Lett ,1998 ,23(2) :97 ~ 99

*

*

*

作者简介 :侯春风 ,男 ,1970 年 4 月出生。博士生。从事光折变非线性光学及量子光学的研究工作。

收稿日期:1999-05-27

收到修改稿日期:1999-07-21