

2004年上海大学博士学位论文 9

非相干空间光孤子的理论研究及 非相干矢量光束的传播演化特性

作者：陈园园

专业：无线电物理

导师：王 奇



上海大学出版社

· 上海 ·

2004 年上海大学博士学位论文

非相干空间光孤子的理论研究及 非相干矢量光束的传播演化特性

作 者： 陈园园

专 业： 无线电物理

导 师： 王 奇

上海大学出版社

· 上海 ·



Shanghai University Doctoral Dissertation (2004)

**Theoretical Analyses of Spatially
Incoherent Solitons and Propagation
Characteristics of Incoherent
Vector Beams**

Candidate: Chen Yuanyuan

Major: Radio Physics

Supervisor: Prof. Wang Qi

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：黄肇明	教授，上海大学通信工程系	200072
委员：丁良恩	教授，华东师范大学物理系	200062
张金仓	教授，上海大学物理系	200436
周常河	研究员，上海光学精密机械研究所	201800
龚尚庆	研究员，上海光学精密机械研究所	201800
导师：王 奇	教授，上海大学	200436

评阅人名单:

黄肇明	教授, 上海大学通信工程系	200072
李春芳	教授, 上海大学物理系	200436
黄国翔	教授, 华东师范大学物理系	200062

评议人名单:

钱士雄	教授, 复旦大学物理系	200433
曹庄琪	教授, 上海交通大学物理系	200240
印建平	教授, 华东师范大学物理系	200062
李 英	教授, 上海大学通信工程系	200072

答辩委员会对论文的评语

陈园园同学的博士学位论文研究了非相干光束在非线性介质中的自陷行为和非相干矢量光束的传播演化特性,是非线性光学孤子理论研究中的重要课题,该工作拓展了现有的光孤子理论,为进一步发展空间光孤子在光通信领域中的应用提供理论依据。

本论文的主要创新点在于:第一、研究了非相干光孤子在传播过程中相干特性的演化规律,得到了光孤子的传播特性取决于光束的初始相干性,且在传播过程中影响孤子相干特性的变化。第二、提出了一种非相干空间耦合孤子对的新概念,得到了三类非相干耦合孤子对的表达式和传播特性,发现耦合孤子对的形成与光束的非相干性无关。第三、将双稳态孤子的研究推广到非相干领域,从质量、动量和能量守恒的角度证明了非相干双稳态孤子可以保持稳定地传播。论文的主要成果已在国内外核心刊物发表。

论文数学推导严密,论证充分;图表制作精良,数据可靠。文章层次分明,行文流畅,体现了陈园园同学具有扎实的数理基础,较深的专业知识积累,严谨的学风和熟练的计算机应用能力。

陈园园同学在答辩过程中,能够准确的回答专家提出的有关问题,思路清晰,对所从事的研究工作有清楚的了解,反映了该同学具有较强的分析问题、解决问题的能力,已具有独立科研的能力。

经答辩委员会无记名投票表决,全票通过,认为陈园园同学的论文达到博士学位论文水平,建议学位委员会授予理学博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过陈园园同学的博士学位论文答辩,建议授予理学博士学位。

答辩委员会主席: **黄肇明**

2004年3月20日

摘 要

空间光孤子是非线性光学领域中的一个重要研究分支,是光与物质相互作用中线性与非线性效应相互制衡的结果.经过近40年的研究,人们已取得了丰硕的研究成果.但一直以来,人们对于光孤子理论和实验上的研究绝大多数都采用相干光源,即得到相干光孤子.近年来,随着实验水平和材料研究的发展,人们已开始利用非相干光源来产生非相干光孤子.非相干空间光孤子的发现改变了人们对孤子的传统观念,为孤子科学、非线性光学以及其他非线性领域开辟了新的研究方向,在实用上也将大大推动基于光孤子的全光通讯器件的发展.

本文主要在理论上研究了非相干光束在非线性介质中的自陷行为,其中包括非相干光孤子的传播特性、非相干耦合孤子对、非相干双稳态孤子和非相干矢量光束在自由空间的传播演化特性.

论文主要包括以下四部分内容和结果:

一、利用相干密度法和互相干函数法分别研究了一维和二维非相干光束在对数型非线性介质中的自陷行为和传播特性.①通过求解光束满足的非线性传播方程,得到了 Gauss 型非相干孤子的解析表达式;②讨论了非相干孤子在介质中的传播演化形式.根据光束初始条件和介质非线性系数的选取,孤子可以存在多种不同的传播状态;③研究了非相干孤子在传播过程中相干特性的变化,得到了相干长度的解析表达式,相干长度在传播过程中的演化与孤子束宽的变化成正比,孤子的演化决定相干性的变化,

而相干性也同样影响到孤子的演化,二者相辅相成;④分析比较了非相干孤子研究中的这两种研究方法.虽然两种方法的处理过程不同,但其本质是统一的,可以得到一致的结果,可以根据具体问题来选取适宜的方法.

二、研究了一种新型的非相干耦合孤子对在光折变介质中的传播特性.这种孤子对中的两束孤子分量光束波长相同,偏振方向相同,彼此不相干,且孤子分量光束本身也是空间非相干的.①得到了亮—亮、暗—暗和亮—暗型耦合孤子对中非相干孤子分量光束的强度分布,发现耦合孤子对的形成与光束的非相干性无关,但耦合孤子对的存在形式与外加电场的偏置方向有关;②在亮—暗型耦合孤子对的研究中,在亮、暗孤子分量强度峰值近似相等的条件下,可以得到孤子对的解析表达式;③分析了构成孤子对非相干孤子分量光束的,彼此无关的,各相干组份光束的传播演化特性,结果表明光束的非相干性仅影响到各相干组份的强度分布,而与孤子对的强度分布无关.

三、非相干光孤子在高阶非线性介质中具有双稳态现象,即双稳态孤子.①通过求解非线性薛定谔方程,得到了双稳态孤子的表达式,发现光束的非相干性不影响双稳态孤子的产生,从而证明了高阶非线性介质中,可以存在宽度相同,但其峰值功率不同的两种非相干孤子态;②讨论了介质的高阶非线性系数对双稳态孤子存在范围的影响,并得到了双稳态孤子存在时光束的截止波长和最小宽度;③根据稳定性条件,证明了所得到的双稳态孤子是一稳定解,可以不受微扰的影响,保持稳定传播,并发现非相干双稳态孤子系统满足质量、动量及能量守恒.

四、讨论了各向异性的非相干矢量光束——角向偏振光束和偶极子光束在自由空间中的传播特性.①利用坡印亭矢量得到了

角向偏振光束横截面上的能量分布,各向异性的非相干性对光束能量的分布产生影响.相干角向偏振光束中心处无能量传播,而非相干性使光束中心处的能量由无到有,并有可能形成能量峰值;②非相干偶极子光束能量分布的讨论中,发现非相干性使光束能量主瓣两侧的旁瓣位置发生移动,随着非相干性的增强,光束的能量旁瓣的位置由远离主瓣到逐渐靠拢,最终合并为单峰结构;③在不同的非相干性条件下,光束具有三种不同类型的演化行为,并给出了具体的判断依据,利用均方宽度定量的描述了光束在传播过程中的形状的变化.

关键词 非相干光束,空间孤子,光折变介质,矢量光束

Abstract

The spatial soliton is one of major research fields in nonlinear optics, and its existence is correlated with the dynamic balance between the linear and nonlinear effects of the interactions between optical fields and media. Plenty of research achievements have been made in the last forty years. But all along, attentions were mainly paid to coherent solitons in both theoretical and experimental investigations. With the recent developments in material science and experimental technology, incoherent solitons excited with incoherent light sources were experimentally observed. The findings of incoherent solitons have changed our traditional understanding of soliton phenomena and led to many new research topics. It's hopeful that the application of incoherent solitons shall improve the development of soliton-based all optical communication systems.

The aim of this thesis is to theoretically study the self-trapping behaviors of incoherent light beams in nonlinear media, including the dynamic evolution of incoherent solitons, incoherently coupled screening soliton pairs and incoherent bistable solitons, and the propagation characteristics of incoherent vector beams in free space.

The paper is arranged as follows:

(1) The self-trapping characteristics of one-dimensional and two-dimensional incoherent optical beams in logarithmically saturable photorefractive media are studied by means of the coherent

density approach and the mutually coherent function approach, respectively. (a) The analytical expressions of Gaussian model incoherent solitons are obtained by resolving the nonlinear propagation equations for incoherent beams. (b) The propagating behaviors of the incoherent solitons are analyzed. It is shown that the solitons can propagate in a stationary or periodical way, depending on the initial beam conditions and the nonlinearity of the media. (c) The coherence length of incoherent soliton is given. Analysis shows that the coherence property of incoherent soliton evolves diversely under different propagation conditions. (d) The coherent density approach and the mutually coherent function approach seem to be different, but they are in fact equivalent to each other.

(2) Incoherently coupled screening soliton pairs can be established in biased photorefractive media under steady-state conditions, each constituent of which is not only spatially incoherent with the other, but also with itself. (a) The properties of incoherently coupled soliton pairs in bright-bright, dark-dark and bright-dark configurations are studied with the coherent density approach, and the intensity expressions for these soliton pairs are given. The results show that the existence of coupled soliton pairs have nothing to do with the incoherence property of beams. However, the types of soliton pairs depend on the direction of external bias voltage. (b) The analytical solution of bright-dark soliton pair can be found when the intensity peaks of the two soliton constituents are approximately equal. (c) The propagation characteristics of coherent components that compose each constituent of coupled soliton pairs are discussed

in details. And their intensity distributions depend closely upon the incoherence property of beams.

(3) Incoherent bistable solitons can exist in high-order nonlinear media. (a) Using the coherent density method, the analytical expression for the spatially incoherent bistable soliton was obtained and the fact that the incoherence of the beam doesn't affect the existence of the incoherent bistable soliton was found. The widths of the two stable state solitons are the same, but their intensity peaks are different. (b) The high-order nonlinearity determines the existence and the intensity peak of the bistable soliton. The cut-off wavelength, the minimum width of incoherent beam and the nonlinearity of medium required for the existence of bistable soliton are found. (c) The incoherent bistable soliton is rigorously proven to keep propagating steadily against perturbation. It is also proven that the system of incoherent bistable soliton satisfies mass, momentum and energy conservation laws.

(4) The propagation characteristics of anisotropic incoherent electromagnetic vector beams: azimuthally polarized beams and dipolar beams in free space are investigated by using Poynting vector method. (a) The energy-flow distribution in the cross-section of azimuthally polarized beams is analyzed. Though no energy-flow occurs in the center of coherent azimuthally polarized beam, the energy-flow can reach the maximum for incoherent beams under certain conditions. (b) The influence of incoherence property on dipolar beams is studied. There exist two sidelobes on the two sides of beam's main peak, whose locations keep moving and whose

intensities keep reducing in the propagation. And the moving behaviors of the sidelobes depend on the incoherence property. (c) The mean squared widths of the beams are obtained, which can be used to describe quantitatively the dynamic evolution of beam's shape. It is found that there are three types of evolution behaviors of the dipolar beam, and the criterions to separate them are presented.

Key words incoherent beam, spatial soliton, photorefractive medium, vector beam

目 录

第一章 绪 论

1.1 引 言	1
1.2 形成机理	4
1.3 研究方法	7
1.4 本论文完成的工作	9

第二章 一维非相干光束自陷理论

2.1 引 言	11
2.2 一维非相干光孤子的传播特性	13
2.3 非相干光束各相干组份的演化规律	21
2.4 光束相干特性分析	24
2.5 已有的实验结果	28
2.6 小 结	29

第三章 二维非相干光束自陷理论

3.1 引 言	31
3.2 圆对称形非相干光束的自陷	32
3.3 光束相干特性分析	44
3.4 椭圆形非相干光束的传播特性	47
3.5 相干密度法与互相干函数法的比较	50
3.6 小 结	53

第四章 空间非相干耦合屏蔽孤子对理论

4.1 引 言	55
---------	----

4.2 理论模型.....	57
4.3 三类空间非相干孤子对的理论分析.....	59
4.4 已有的实验结果	71
4.5 小 结.....	72
第五章 高阶非线性介质中的非相干双稳态孤子理论.....	74
5.1 引 言.....	74
5.2 非相干双稳态孤子.....	76
5.3 非相干双稳态孤子解的稳定性.....	83
5.4 稳态孤子系统中的守恒定律	86
5.5 双稳态孤子在光通信器件中的应用原理	88
5.6 已有的实验结果	91
5.7 小 结.....	92
第六章 各向异性的非相干矢量光束的传播特性	94
6.1 引 言.....	94
6.2 光束的坡印亭矢量.....	95
6.3 各向异性非相干角向偏振光束.....	97
6.4 各向异性非相干偶极子光束	106
6.5 已有的实验结果	118
6.6 小 结.....	118
第七章 回顾与展望	120
7.1 论文工作的回顾	120
7.2 存在的问题和对未来的展望	123
参考文献.....	125
致 谢.....	139

第一章 绪 论

1.1 引 言

自 1965 年,人们首次在理论上提出光束自陷的概念以来^[1],空间光孤子一直是非线性学科领域中的一个重要研究课题。一般来说,光束在任何介质中传播都会产生衍射,使光束加宽。而在非线性介质中由于非线性效应产生的自聚焦作用,使光束会聚。当衍射与自聚焦的作用达到平衡时,光束直径保持不变,形成稳定传播,这就叫做自陷,即形成了空间光孤子^[2-5]。空间孤子在介质中形成的可控柔性光波导可以引导其他光束,因此光孤子可用做全光线路中的模块单元,对光束实施引导和控制,从而将对全光通信系统的实现产生巨大的推动作用^[6-12]。

近 40 年以来,人们已经对空间光孤子进行了广泛而深入的研究,在原子气体^[13]、CS₂ 溶液^[14]、半导体^[15]、聚合物^[16]、光折变^[17]等不同非线性材料中发现了多种类型的空间孤子,如克尔孤子^[18]、光折变孤子^[17]、二次型孤子^[19]及周期介质中的布拉格孤子^[20]、分立孤子^[21]、磁光孤子^[22]等。然而,一直以来,人们对于光孤子理论和实验上的研究绝大多数都限于相干光的范围内,即认为自陷光束各点的相位彼此相关,因此这对于光源的要求很高。1996 年, M. Mitchell 等人利用氩离子激光器发出的光束通过旋转散射器产生的空间非相干光束,在铌酸锆钽(SBN: