

文章编号:1004-4213(2011)12-1875-3

基于强非局域空间光孤子的温度传感器原理

寿倩

(华南师范大学 光子信息技术广东省高校重点实验室, 广州 510006)

摘 要:为了让温度传感器在集成化全光控制中找到实现途径,提出一种基于非局域空间光孤子传输的温度传感器的理论方案.以铅玻璃作为非局域空间光孤子的传输介质,通过研究圆柱形铅玻璃中,中心入射光束在传输过程中的相移问题,得出在环境温度 0.32 °C 的改变就可以引起孤子 π 相移的结论.此温度改变对相移的调制有望为基于干涉仪原理的温度传感器提供一个可行且灵敏度较高的实现方案.

关键词:空间光孤子;相移;温度传感器

中图分类号:O437.5

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114012.1875

0 引言

温度传感器是一种检测温度的器件,具有种类多、应用广、发展快等特点.众所周知,日常使用的材料及电子元件大部分特性都随温度而变化,最常用的温度传感器有热电阻和热电偶两类产品.随着光学产业的发展,光信息科学技术成为 21 世纪的主旋律,它以光通信、光信息处理等为主要特征.空间光孤子是衍射发散效应和非线性聚焦效应相平衡而产生的一种光束束宽不变的自导传输状态.近 10 年来研究很热的强非局域空间光孤子,即孤子束宽远小于材料响应函数特征宽度^[1]的空间光孤子,由 Snyder 和 Mithchell 1997 年发表在 *Science* 上的文章所提出^[2].人们可以利用孤子间的相互作用,实现全光操纵的目的^[3-6],拟或设计不同的波导结构^[7-9]和介质折射率的分布^[10-12]来实现控制光输出位置的目的.特别是随着非线性科学的发展,空间光孤子的形成对入射功率和光束的相干性要求越来越低,毫瓦量级的入射功率甚至是白光都可以形成^[13].另外,空间光孤子有着横向高维性,矢量孤子^[14-15]、高阶孤子^[16-18]等有着复杂横向空间模式的光孤子引发更加丰富的光、光相互作用模式.

本文的工作就是以铅玻璃作为非局域空间光孤子的传输介质,研究圆柱形铅玻璃中,中心入射光束在传输过程中的相移问题,得出在环境温度 0.32 °C 的改变就可以引起孤子 π 相移的结论.由此,提出一种基于非局域空间光孤子传输的温度传感器方案.

1 铅玻璃中非局域空间孤子的相移研究

如图 1,对于圆柱形铅玻璃材料,中心入射的情况,我们下面来解析地讨论其相移的大小.铅玻璃的非线性机理与液晶完全不同,非线性响应来源于光致热效应.入射到铅玻璃中的光束被少量地吸收并以光束为中心被传导到边界.柱状铅玻璃被放置在热池当中,热池吸收了传导到玻璃边界的热量并保持边界的恒温.这样在铅玻璃当中就形成了一个光致温度梯度分布^[18-19]

$$\begin{aligned} \nabla^2 T(r) &= -\frac{\alpha}{\kappa} |I(r)|^2 \\ T(r)|_{r=R} &= T_0 \end{aligned} \quad (1)$$

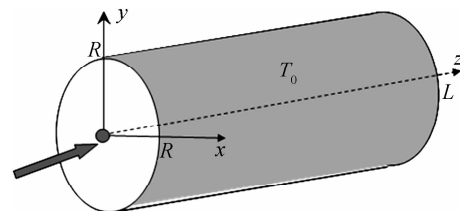


图 1 光束中心入射圆柱形铅玻璃示意图

Fig. 1 The schematic describing the incidence of light into the cylindrical lead glass

式中, α 、 κ 分别是热吸收系数和热传导系数. $T(r)$ 、 T_0 分别是温度梯度分布函数和边界温度, R 是圆柱半径. $I(r) = |A(r)|^2$ 是光强分布, $A(r)$ 是傍轴光束.注意到热传导方程在孤子情况下,即 $I(r, z) = I(r)$ 时是二维的.光致的温度改变成比例地引起一个折射率改变 $\Delta n(r) = \beta(T(r) - T_0)$.光致折射率改变满足的泊松方程和边界条件为

基金项目:国家自然科学基金(No. 60908003)资助

第一作者:寿倩(1978-),女,讲师,博士,主要研究方向为非线性光学. Email: laser120@163.com

收稿日期:2011-06-16;修回日期:2011-08-14

$$\nabla^2 \Delta n(r) = -\frac{\alpha\beta}{\kappa} |I(r)|^2$$

$$\Delta n(r)|_{r=R} = n'_0 \quad (2)$$

式中 n'_0 为 T_0 温度下对应的折射率, 并且也有 $\Delta n'_0 = \beta \Delta T_0$. 这个折射率梯度分布相当于一个热透镜, 引起光束的自聚焦. 所以热传导方程(2)和光束传输方程相互耦合才能完整地描述光束在铅玻璃中传输的特性^[18,21]

$$\nabla^2 A + 2ik \frac{\partial A}{\partial z} + 2k^2 \frac{\Delta n}{n_0} A = 0 \quad (3)$$

式中 $k = \omega n_0 / c$, n_0 是线性折射率. 式(2)在数学上等同于静电学中三维无限长的线电荷激发的二维的电势分布, 这个电势的参考点在 $r=R$ 处. 于是本文可以利用静电学中的高斯定理来求解光致折射率的分布

$$\Delta n - n'_0 = \frac{\alpha\beta R}{\kappa} \int_r^R F(r') dr' = \frac{\alpha\beta R}{\kappa} \int_r^R \frac{1}{2\pi r'} \left(\int_0^{r'} |A(r'')|^2 2\pi r'' dr'' \right) dr' \quad (4)$$

式中 $F(r) = 1/(2\pi r) \int_0^r |A(r')|^2 2\pi r' dr'$ 表示电场分布. 为了得到式(4)的具体表达式, 设光束的孤子解为

$$A(r) = \frac{\sqrt{p_0}}{\sqrt{\pi\omega_0}} \exp[i\theta(z)] \exp\left[-\frac{r^2}{2\omega_0^2}\right] \quad (5)$$

式中 p_0 是输入功率, ω_0 是光束束宽, $\theta(z)$ 是光束相位. 将式(3)带入式(4), 得

$$\Delta n = n'_0 + \frac{\alpha\beta p_0}{4\pi\kappa} \left[\Gamma\left(0, \frac{R^2}{\omega_0^2}\right) - \Gamma\left(0, \frac{r^2}{\omega_0^2}\right) - \ln\left(\frac{r^2}{R^2}\right) \right] \quad (6)$$

根据 Snyder's 模型, 非线性折射率只需取到泰勒展开的第二阶

$$\Delta n(r) = n'_0 + n^{(0)} - r^2 n^{(2)} \quad (7)$$

其中

$$n^{(0)} = \frac{\alpha\beta p_0}{4\pi\kappa} \left[\Gamma\left(0, \frac{R^2}{\omega_0^2}\right) + \ln\left(\frac{R^2}{\omega_0^2}\right) + \gamma \right] \quad (8)$$

$$n^{(2)} = \frac{\alpha\beta p_0}{4\pi\kappa\omega_0^2}$$

其中 $\gamma = 0.577\ 215\ 664\ 9$ 是欧拉常量. 令 $A' = A \exp[ik/n_0(n'_0 + n^{(0)})]$ 带入式(3), 可将其简化为

$$\nabla^2 A + 2ik \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{2k^2}{n_0} n^{(2)} A = 0 \quad (9)$$

将式(5)和式(7)带入式(3), 分别取 r 和 r_2 的系数为零, 得到

$$\frac{1}{\omega_0^4} = \frac{2k^2}{n_0} n^{(2)}$$

$$k \frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{k^2}{n_0} (n'_0 + n^{(0)}) \quad (10)$$

再结合式(7)分别得到相移和临界功率的解析解

$$\theta = \left[\frac{k}{n_0} (n'_0 + n^{(0)}) - \frac{1}{k\omega_0^2} \right] z$$

$$p_c = \frac{2\pi n_0 \kappa}{\alpha\beta k^2 \omega_0^2} \quad (11)$$

当环境温度(即边界温度)改变 ΔT_0 引起折射率边界条件的改变 $\Delta n'_0$, 进而使光束的相位发生移动 $\Delta\theta = k\Delta n'_0 z / n_0 = k\beta\Delta T_0 z / n_0$.

下面用笔者 2009 年发表在 *Optics Letters* 杂志上的一篇文章^[20]中的参量来估算孤子的相. 取 $\beta = 14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $k = 2\pi / (514 \times 10^{-9} \text{ m})^{-1}$, $n_0 = 1.9$, $z = 0.06 \text{ m}$. $\Delta T_0 = 0.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 的改变就可以引起 π 的相移. 可见相位随环境温度的改变具有较高的灵敏度. 这时, 只需用另外一束与孤子光束相干的参考光与之干涉, 就可以根据干涉条纹的移动情况来判断温度的改变大小. π 相移的有效产生是实现基于干涉原理的对光信号进行处理和控制(比如基于 Mach-Zehnder 干涉仪原理的光开关)的关键因素. 我们可以将非局域传输介质部分作为传感器的探头, 实现灵敏度较高的温度探测.

2 结论

本文研究了一种基于非局域空间光孤子传输的温度传感器原理. 利用解析得到的铅玻璃中空间光孤子相位的解, 得出在环境温度 0.32°C 的改变就可以引起孤子 π 相移的结论. 此传感器的方案具有较高的探测灵敏度, 有可能成为集成化全光控制的实现途径之一.

参考文献

- [1] KROLIKOWSKI W, BANG O, RASMUSSEN J J, *et al.* Modulational instability in nonlocal nonlinear kerr media[J]. *Physical Review E*, 2001, **64**(1): 016612-8.
- [2] SNYDER A W, MITCHELL D J. Accessible solitons[J]. *Science*, 1997, **276**(5318): 1538-1541.
- [3] MA Yang-hua, ZHANG Peng, Zhao Jianlin, *et al.* Numerical investigations of interactions among planar bright photorefractive screening solitons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **35**(2): 252-256.
马仰华, 张鹏, 赵建林, 等. (1+1)维光折变亮屏蔽孤子相互作用的数值分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 252-256.
- [4] JURGEN P, JOCHEN S, DRAGER D, *et al.* Optical control of arrays of photorefractive screening solitons[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(6): 438-440.
- [5] CHRISTODOULIDES D N and EUGENIEVA E D. Blocking and routing discrete solitons in two dimensional networks in nonlinear waveguide arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(23): 233901-4.
- [6] HADZIEVSKI L, MALUEKOV A, STEPIC M, *et al.* Power controlled soliton stability and steering in lattices with saturable nonlinearity[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(3): 033901-4.
- [7] ABLOWITZ M J, MUSSLIMANI Z H. Discrete diffraction Managed spatial solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(25): 254102-4.

- [8] ABLOWITZ M J, MUSSLIMANI Z H. Discrete vectors spatial solitons in a nonlinear waveguide arrays[J]. *Physical Review E*, 2001, **65**(5): 056618-13.
- [9] VICENCIO R A, MOLINA M I, KIVSHAR Y S. Switching of discrete optical solitons in engineered waveguide arrays[J]. *Physical Review E*, 2004, **70**(2): 026602-8.
- [10] KARTASHOV Y V, CRASOVAN L C, ZELENINA A S, *et al.* Soliton eigenvalue Control in optical lattices[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(14): 143902-4.
- [11] KARTASHOV Y V, VYSLOUKH V A, TORNER L. Packing, unpacking and steering of multicolor solitons in optical lattices[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(12): 1399-1401.
- [12] ALESHKEVICH V A, KARTASHOV Y V, ZELENINA A S, *et al.* Eigenvalue control and switching by fission of multisoliton bound states in planar waveguides[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(5): 483-485.
- [13] MITCHELL M, SEGEV M. Self-trapping of incoherent white light[J]. *Nature*, 1997, **387**: 880-883.
- [14] GARCIA- RIPOLL J J, PEREZ-GARCIA V M, OSTROVSKAYA E A, *et al.* Dipole mode vector solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(1): 82-85.
- [15] SNYDER A W, HEWJETT S J, MITCHELL D J. Dynamic spatial solitons[J]. *Physical Review Letters*, 1994, **72**(7): 1012-1015.
- [16] ZHANG Xia-ping, LIU You-wen. Analytical solution of high-order mode spatial optical solitons propagating in the strong nonlocal media[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2418-2421.
张霞萍,刘友文. 强非局域介质中传输光束的高阶模孤子解[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2418-2421.
- [17] LIU Jin-long, LI Hai, CHEN Jin-hua, *et al.* Family of super-Gaussian beams spatial optical solitons in sub-strongly non-local nonlinear media[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1414-1417.
刘金龙,李海,陈金华,等. 亚强非局域介质中的超高斯空间光孤子族研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1414-1417.
- [18] ROTSCCHILD C, SEGEV M, XU Z Y, *et al.* Two-dimensional multipole solitons in nonlocal nonlinear media[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(22): 3312-3314.
- [19] ROTSCCHILD C, COHEN O, MANELA O, *et al.* Solitons in nonlinear media with an infinite range of nonlocality: first observation of coherent elliptic solitons and of vortex-ring solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **95**(21): 213904-4.
- [20] SHOU Q, LIANG Y B, JIANG Q, *et al.* Boundary force exerted on spatial solitons in cylindrical strongly nonlocal media[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(22): 3523-3525.

Theory of the Temperature Sensor Based on the Strongly Nonlocal Spatial Optical Soliton

SHOU Qian

(Key Laboratory of Photonic Information Technology of Guangdong Higher Education Institutes, South China Normal University, Guangzhou 10631, China)

Abstract: In order to accomplish the all-optical control in the aspect of temperature sensors, a theoretical design of temperature sensors is proposed based on the nonlocal spatial solitons. Taking lead glass as the propagation media of the soliton, the phase shift of the center-incident soliton is studied in the cylindrical lead glass. It is concluded that a temperature change of $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ can lead to π phase shift of the nonlocal solitons. The phase shift modulation by the temperature change will be a practicable and sensitive design of the temperature sensor based on the interferometer theory.

Key words: Spatial optical solitons; Phase shift; Temperature sensor