

文章编号: 1001-3806(2006)04-0363-03

光纤布喇格光栅中布喇格孤子传输的稳定性分析

桑新柱¹, 余重秀¹, 王葵如¹, 吕乃光²

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2 北京机械工业学院 电子信息工程系, 北京 100085)

摘要: 布喇格孤子是光纤布喇格光栅的非线性效应和色散效应综合作用的结果, 揭示了重要的物理现象, 在基于光纤缓存器件中具有重要应用。从非线性耦合模方程出发给出了布喇格孤子的解析解, 以它们作为初始条件, 数值研究了布喇格孤子传输的稳定性, 得到布喇格孤子传输的稳定传输区、多振荡模式区和散射区。数值模拟了布喇格孤子在多振荡模式区和散射区的传输变化。对于设计新型器件和开展实验工作提供了有益的指导。

关键词: 非线性光学; 光纤布喇格光栅; 布喇格孤子; 稳定性

中图分类号: O437 O473 **文献标识码:** A

Stability analysis of Bragg solitons in the fiber Bragg grating

SANG Xin-zhu¹, YU Chong-xiu¹, WANG Kui-ru¹, LÜ Nanguang²

(1 School of Electronic Engineering Beijing University of Posts and Telecommunications Beijing 100876 China; 2 Department of Electronic Engineering Beijing Institute of Machinery Beijing 100085, China)

Abstract Bragg solitons are formed by the balance between the nonlinear effect and dispersion in the fiber Bragg grating which reveals some important physical phenomena and offers its application in the optical buffer. Based on the nonlinear coupled mode equations, the analytical solution of Bragg solitons is given. With the analytical solution as an initial condition, the stability of Bragg solitons in the fiber Bragg grating is numerically investigated. There are three transmission modes of Bragg solitons, such as stable mode, multiple vibrating mode and scattering mode. The evolutions of Bragg solitons in the multiple vibrating mode and scattering mode are analyzed. This research gives some valuable results for novel device design and related experiments.

Key words nonlinear optics; fiber Bragg grating; Bragg soliton; stability

引 言

光纤布喇格光栅的线性特性已经为人们熟知, 可以用于实现光纤通信系统中的激光光源的选频、窄带滤波、插分复用、色散补偿和放大器的增益平坦等功能。利用光纤光栅谱对环境变化的响应, 可以实现对温度、应力、扭矩等物理量的传感检测。在光纤布喇格光栅线性特性的研究和应用的同时^[1,2], 非线性特性的理论研究也不断深入并产生一些有趣的现象, 展现出它们的潜在应用前景。自 20 多年前光孤子在光纤中的传输得到实验验证以来, 光纤孤子的研究取得巨大的进步, 并成为高速长距离光纤传输的候选技术。光纤孤子的特性基于色散和非线性效应的平衡, 典型的作用长度为几百米到几千米。非线性耦合模方程预

测了布喇格光栅的色散和非线性作用可以形成布喇格孤子^[3~5], 在理论上可以以 0 到 c/\bar{n} (c 为真空中的光速, \bar{n} 为光纤纤芯的有效折射率) 之间的任何速度在光纤布喇格光栅中传输, 并且已经在实验中观察到了低于光纤中光传播速度的布喇格孤子^[6]。对于布喇格孤子, 在足够高的功率条件下, 在光纤布喇格光栅只需要几个厘米就可以实现色散和非线性作用的平衡。目前, 已经实验观察到在光纤布喇格光栅中传播速度为光纤中传播速度一半的布喇格孤子。布喇格孤子发展成为光学和非线性科学中一个令人鼓舞的研究课题。对于它的研究兴趣源于高非线性光纤、光纤布喇格光栅制作技术的不断进步和它们在新型器件中的潜在应用^[7]。目前具有挑战性的研究问题是在光纤布喇格光栅中捕获光, 期望在巧妙制作的布喇格光栅中获得接近零速度传播的光, 并在理论方面取得一定的研究进展^[8,9], 目前正在开展实验方面的研究。它的研究不仅具有重大的物理意义, 在基于光纤的全光缓存器件方面更是有着巨大的潜在应用。但是, 布喇格孤子只在某些情况下是稳定的, 因此分析它的稳定性为实验提供指导是非常重要的。这里利用布喇格孤子的解析解作为初始条件, 对它在光纤布喇格光栅中的传输情况进行数值研究。

基金项目: Hong Kong RGC Competitive Earmarked Research Grant(9040707); 北京市教委科技发展计划基金资助项目(200411232005)

作者简介: 桑新柱(1977-), 男, 博士, 讲师, 主要从事基于光纤的光电子器件、保密光纤通信和光子信息处理等方面的研究。

E-mail: xzsang@126.com

收稿日期: 2005-07-13 收到修改稿日期: 2005-09-02

1 布喇格孤子的解析解

在光纤布喇格光栅中考虑克尔非线性效应, 在 x 方向的折射率可以由下式给出:

$$n(x) = \bar{n} + \Delta n(x) \cos\left\{\frac{2\pi}{\Lambda}x\right\} + n_2 I \quad (1)$$

式中, \bar{n} 是光纤纤芯的平均折射率, $\Delta n(x)$ 是光栅折射率的调制幅度 (对于均匀布喇格光栅, $\Delta n(x) = \Delta n$, 为常数), Λ 是光栅的周期, n_2 是非线性折射率系数, I 是光的强度^[10]。根据耦合模理论, 光栅中的电场为:

$$E(x, t) = [E_+(x, t) \exp(ik_B x) + E_-(x, t) \exp(-ik_B x)] \exp(-i\omega_B t) + c.c. \quad (2)$$

式中, $k_B = \pi/\Lambda$ 是布喇格波数, ω_B 为布喇格角频率, t 为时间, E_{\pm} 是前向和后向传播模式的包络, $c.c.$ 表示复共轭。假设 E_{\pm} 是缓慢变化的, E_{\pm} 满足以下非线性耦合模方程^[3]:

$$\begin{cases} +i\frac{\partial E_+}{\partial x} + i\frac{\bar{n}}{c}\frac{\partial E_+}{\partial t} + \kappa E_- + \Gamma(|E_+|^2 + 2|E_-|^2)E_+ = 0 \\ -i\frac{\partial E_-}{\partial x} + i\frac{\bar{n}}{c}\frac{\partial E_-}{\partial t} + \kappa E_+ + \Gamma(|E_-|^2 + 2|E_+|^2)E_- = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\kappa = \pi\Delta n/\Lambda n_0$, 是耦合系数, n_0 为纤芯中的光占有所有传输光的比值 (≈ 0.8), $\Gamma = 4\pi n_2/(\lambda Z_0)$, 是自相位和交叉相位系数, λ 是自由空间中的波长, Z_0 是真空中阻抗。

对于 (3) 式, 进行以下归一化处理:

$$E_+ = \sqrt{\frac{\kappa}{\Gamma}}U, E_- = \sqrt{\frac{\kappa}{\Gamma}}V, z = \frac{x}{\Lambda}, T = \frac{\bar{n}}{\kappa c}t \quad (4)$$

则得到以下归一化非线性耦合模方程:

$$\begin{cases} +i\frac{\partial U}{\partial z} + i\frac{\partial U}{\partial T} + V + (|U|^2 + 2|V|^2)U = 0 \\ -i\frac{\partial V}{\partial z} + i\frac{\partial V}{\partial T} + U + (|V|^2 + 2|U|^2)V = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, U, V 分别为前向和后向传播电场包络的归一化幅度, z, T 分别为归一化的传播距离和传播时间。(5) 式很难用解析法求解, 在忽略自相位调制项的情况下, (5) 式可简化成完全可积的具有孤子解的 MTM (massive thirring mode)^[3], 得到它的解析孤子解。这类孤子在它们的功率谱位于带隙内和接近于布喇格谐振频率的情况下可以不受影响地传输, 分析表明, 它们的传播速度可以远低于均匀介质中光的传播速度。ACEVES 等后来又对 MTM 进行了扩展^[4], 考虑了自相位调制项, 可得到双参数布喇格孤子的解为:

$$\begin{cases} U = (1-v)^{1/2}W(X) \exp[i(\phi + \sigma)] \\ V = (1+v)^{1/2}W^*(X) \exp[i(\phi + \sigma)] \end{cases} \quad (6)$$

式中, “*” 表示复共轭, $X = v(z - vT)$, $W(X) =$

$\frac{(1-v^2)^{1/4}}{(3-v^2)^{1/2}} \sin\theta \operatorname{sech}[(\sin\theta)X - i(\theta/2)], \phi = \frac{4v}{3-v^2} \arctan\{\tanh[(\sin\theta)X] \tan(\theta/2)\}, \sigma = v(\sin\theta) \times (vz - T)$ 。式中, 参数 v (其单位为均匀光纤中光传播的速度 c/\bar{n} , 已做归一化处理) 决定孤子传播的速度, 自由参数 θ 取值范围为 $0 < \theta < \pi$, 它决定孤子的幅度和宽度。在 $v = 0.155$ 和 $\theta = \pi/2$ 时布喇格孤子的传输情况见图 1。

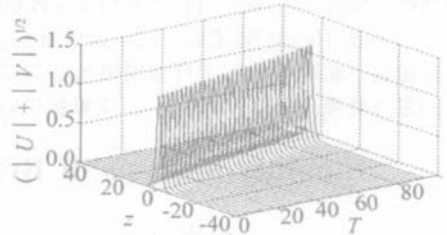


Fig 1 Transmission of slow Bragg soliton in the fiber Bragg grating

2 稳定性分析

通过上面的分析可以知道, 高强度脉冲在光纤布喇格光栅中传输存在布喇格孤子解。但是布喇格光栅孤子只是在某些情况下是稳定的, 而在有些情况下孤子的特性在传播过程中会被破坏, 因此, 分析孤子的稳定性为实验提供指导是非常重要的。MALOMED 教授等利用平均拉格朗日变分法分析了周期性非线性介质中 MTM 模型中带隙孤子的振动模式^[11], 分析得出带隙孤子在某些情况下是不稳定的, 而在有些情况下是稳定的。采用耦合模理论分析光带隙孤子可以发现^[11], 低强度孤子具有长期谐振的振荡状态, 而高强度孤子由于一系列的谐振不稳定性而产生辐射。利用布喇格孤子的解析解 (6) 式作为初始条件, 采用快速傅里叶变化和四阶龙格库塔法数值分析孤子传输的稳定性, 得到与参数 v 和 θ 有关的稳定性分析结果如图 2 所示。可以看出, 在 $\theta < 1.5881$ 时孤子的传输是稳

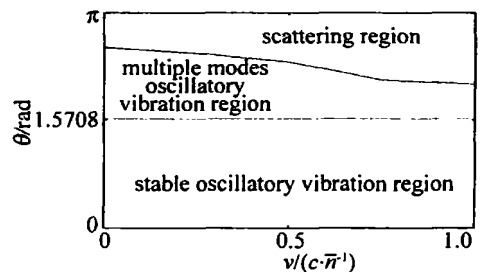


Fig 2 Different region of stable and instable Bragg grating solitons

定的; 在 $\theta > 1.5881$ 时, 孤子的传输进入多振荡模式区, 产生分裂; 继续增加 θ 值, 布喇格孤子进入散射区, 并与孤子的传播速度有关。在 $v = 0.4, \theta = 1.85$ 和 $v = 0.5, \theta = 2.4$ 情况下模拟布喇格孤子在光纤布喇格光栅中传输过程中多振荡模式区和散射区的变化分别见图 3a 和图 3b。

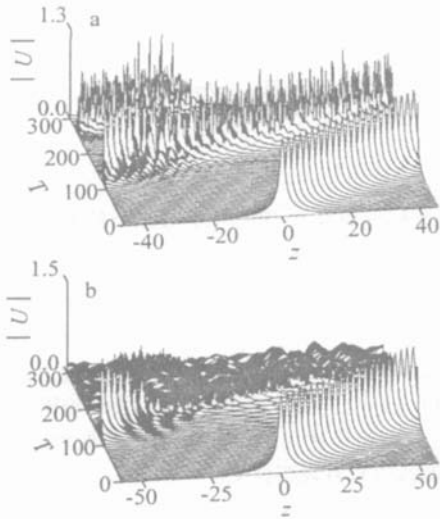


Fig 3 Evolution of unstable Bragg grating solitons

a—multiple modes oscillatory vibration region b—scattering region

EGGLETON 等实验研究了布喇格孤子在光纤布喇格光栅中的产生^[12], 研究表明, 在入射脉冲强度为 $20\text{GW}/\text{cm}^2$ 时, 可以形成速度降低的稳定布喇格孤子, 其相应布喇格孤子解的参数 θ 和 v 分别约为 0.16 和 0.74 对应于本文中分析的稳定谐振区; 在入射脉冲大于 $55\text{GW}/\text{cm}^2$ 时, 孤子脉冲开始分裂, 进入多模振荡区。他们还数值研究了入射脉冲为 $100\text{GW}/\text{cm}^2$ 时光纤布喇格光栅中电场强度随时间的变换, 发现 150ps 后电场的能量就分为 3 部分。其实验和理论研究结果属于本文中分析的特殊情况, 与作者的结果一致。

3 结论

布喇格孤子在光纤布喇格光栅中传输的稳定性对于研究布喇格孤子的特性已经在新型光纤器件中的应用是十分重要的。从非线性耦合模方程出发给出了布喇格孤子的解析解, 以它们作为初始条件, 数值研究了

布喇格孤子传输的稳定性, 得到布喇格孤子传输的稳定传输区、多振荡模式区和散射区。数值模拟了布喇格孤子多振荡模式区和散射区的传输变化。对于设计新型器件和开展实验工作提供了有益的指导。

参考文献

- [1] ZHOU H Q, XIA G Q, DENG T *et al* Influence of external cavity length variation on the lasing wavelength of the fiber external cavity semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 476~490 (in Chinese).
- [2] CHENG Ch Y, QIAO X G, JIA Zh A *et al* Study on wavelength detection system based on tunable filters with a novel multiplexing structure [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 150~153 (in Chinese).
- [3] CHRISTODOULIDES D N, JOSEPH R I Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structures [J]. *Phys Rev Lett* 1989, 62(15): 1746~1749
- [4] ACEVES A B, WABNITZ S Self-induced transparency solitons in nonlinear refractive periodic media [J]. *Phys Lett* 1989, A141(1~2): 37~42
- [5] de STERKE C M, SIFFERT J E Gap solitons [J]. *Progress in Optics* 1994, 33(1): 203~260
- [6] EGGLETON B J, SIFFERT R, de STERKE C M *et al* Bragg grating soliton [J]. *Phys Rev Lett* 1996, 76(10): 1627~1630
- [7] SANG X Zh Research on properties of microstructured optical devices and their applications [D]. Beijing Beijing University of Posts and Telecommunications 2005. 46~81 (in Chinese).
- [8] MAK W C K, MALOMED B A, CHU P L Interaction of a soliton with a local defect in fiber Bragg grating [J]. *J O S A*, 2003, B20(4): 725~735
- [9] MAK W C K, MALOMED B A, CHU P L Slowdown and splitting of gap solitons in apodized Bragg gratings [J]. *Journal of Modern Optics* 2004, 51(14): 2141~2158
- [10] STOLEN R H, LIN C Self-phase modulation in silica optical fiber [J]. *Phys Rev* 1978, A17(4): 1448~1453
- [11] MALOMED B A, TASCAL R S Vibration modes of a gap soliton in a nonlinear optical medium [J]. *Phys Rev* 1994, E49(6): 5787~5795
- [12] EGGLETON B J, de STERKE C M. Nonlinear pulse propagation in Bragg grating [J]. *J O S A*, 1997, B14(11): 2980~2993 (in Chinese).
- [6] WALPIA L M. Solutions for planar optical waveguide equations by selecting zero elements in a characteristic matrix [J]. *J O S A*, 1985, A2(4): 595~602.
- [7] CHIANG K S. Construction of refractive index profiles of planar dielectric waveguides from the distribution of effective indexes [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1985, LT-3(2): 385~391.
- [8] NIKOLOPOULOS J, YIP G L. Accurate modeling of the index profile in annealed proton-exchanged LNbO_3 waveguides [J]. *SPE*, 1991, 1583 71~82
- [9] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. New York: Pergamon, 1980 1~10.
- [10] CAIAI L, POKROVSKII L, TERFUGOV N. Optical and structural properties of annealed PE: LNbO_3 waveguides formed with pyrophosphoric and benzoic acids [J]. *J A P*, 1993, 73(5): 3125.
- [11] LU B, LU L, XU L. Characteristics of recording and thermal fixing in lithium niobate [J]. *Appl Opt* 1998, 37(11): 2170~2176

(上接第 362 页)

熟, 能给出折射率的分布是一件很有意义的工作。

参考文献

- [1] DUNBAR B P, PETER B F. Defect-based description of lithium diffusion into lithium niobate [J]. *J A P*, 1994, 76(8): 3422~3428
- [2] PETER B F, NORWOOD R G, BIRD C D *et al* Stoichiometry issues in single-crystal lithium tantalate [J]. *J A P*, 1995, 78(3): 4647~4650
- [3] PETER B F, NORWOOD R G, CALVERT G D. Compositional uniformity in growth and poling of large diameter lithium niobate crystals [J]. *J Crystal Growth* 1991, 6(2): 61~68
- [4] DUNBAR B P. Analysis of diffusion in lithium niobate [J]. *J Mater Sci* 1993, 28(8): 302~315
- [5] CHENG X F, XIE Sh W, XIA Y X *et al* Theoretical modeling and characterization of annealed proton-exchanged planar waveguides in z-cut LNbO_3 [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2000, 27(7): 611~615