

文章编号: 0258-7025(2003)11-1003-03

强脉冲在光纤光栅中的传输特性

宋继恩, 黄永清, 郭 勇, 陈 雪, 任晓敏

(北京邮电大学电信工程学院光通信中心, 北京 100876)

摘要 利用数值模拟的方法, 计算分析了强高斯脉冲在光纤光栅中的传输特性, 研究了强高斯脉冲向基态和高阶孤子的转化和传输, 分析了光栅带外孤子的特点, 并提出了在波分复用系统中的应用。

关键词 光电子学; 光纤光栅; 数值模拟; 非线性; 光孤子; 波分复用

中图分类号 TN 012 **文献标识码** A

Transmission Properties of the Strong Pulse in Fiber Gratings

SONG Ji-en, HUANG Yong-qing, GUO Yong, CHEN Xue, REN Xiao-min

(Optical Communications Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Using numerically calculation, it is proved that the bound and high order soliton might be formed when Gauss pulse propagated in optical fiber grating though there are extremely strong GVD around the photo band gap. The characteristic of the fiber soliton is analysed, and then the applications on the WDM system is put forward.

Key words optoelectronics; optical fiber grating; numerically calculation; nonlinear; optical soliton; WDM

1 引 言

光纤光栅体积小、成本低、与光纤系统兼容性好、插入损耗低及光学性能优异等优点, 成为光通信系统不可缺少的组成部分。作为反射式带通或带阻滤波器, 光纤光栅可用来做激光器谐振腔^[1]、波分复用系统复用/解复用器^[2,3]和色散补偿器^[4]等许多器件。光纤光栅的这些应用都基于线性特性, 然而光纤光栅的非线性特性也已引起了人们的关注, 但国内这方面的研究还很少^[5]。研究表明, 当强光注入光纤光栅后, 由于介质的有效折射率将与光强有关, 因而它的特性不但不同于普通光纤, 也与一般意义上的光纤光栅(指其线性特性)有着显著的差异。在非线性作用下, 会导致光学双稳态, 会产生光纤光栅孤子, 造成光学推扫现象(Optical Pushbroom), 还会形成参量放大; 这些都是光纤光栅的非线性特性^[6]。这些新特性有望应用于超窄光脉冲产生和模式转换、全光交换等诸多方面。

本文利用分步傅里叶(SSF)方法研究了强高斯脉冲在光纤光栅带隙附近的传输特性。

2 光纤光栅特性

众所周知, 在均匀光纤光栅中存在一个 $\Delta\lambda$ (被称之为反射带宽), 光纤光栅中波长处于这一范围内的光会被强烈反射(如图 1 所示)。当波长离开反射带隙很近(距离约和反射带宽同样数量级)时, 光信号虽然会通过光纤光栅, 但同时会经历一个极强的色散(约为普通光纤的 $10^5 \sim 10^6$ 倍)^[6]。光纤光栅反射带隙外色散系数 k_2^{ξ} 为

$$k_2^{\xi} = \frac{d^2 k}{d\omega^2} = -\kappa^2 \frac{\bar{n}^2}{c^2} \frac{1}{(k - \pi/d)^3} \quad (1)$$

式中, k 为波数, κ 为耦合系数, d 为光栅周期, ω 为频率, c 为光速, \bar{n} 为折射率。

图 1 中, 我们计算了在给定光纤光栅参数 κ 和 d 的情况下 k_2^{ξ} 同波数 k 的关系。

收稿日期: 2002-04-04; 收到修改稿日期: 2002-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60077027)资助项目。

作者简介: 宋继恩(1976—), 男, 内蒙古包头人, 北京邮电大学电信工程学院光通信中心博士研究生, 主要研究领域为光通信器件及非线性光学。E-mail: sjnmm@sohu.com; songjien@sina.com

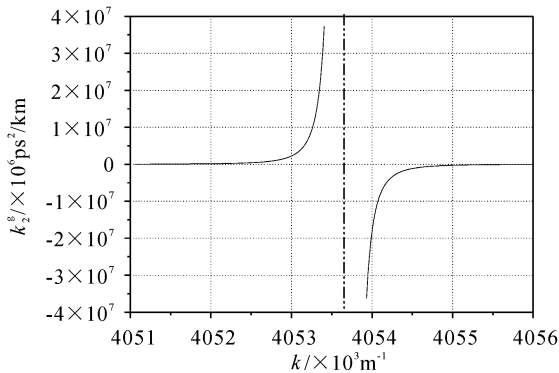


图 1 光纤光栅在反射带隙附近的色散曲线
Fig. 1 Dispersion of the fiber grating with
 $k = 300 \text{ m}^{-1}$ and $\lambda_B = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$

3 脉冲在反射带隙外的传输特性

在光纤中,当强脉冲在负色散介质中传播时,由于非线性与色散的相互作用,会产生光孤子^[7]。同理,在光纤光栅反射带隙外强烈的色散与非线性也会产生光孤子。虽然对光纤孤子研究已非常深入,但对于光栅孤子研究得非常少。因此,有必要对光栅孤子进行系统深入的研究。

强高斯脉冲在光纤光栅反射带隙附近的传播,可以由光纤光栅非线性薛定谔方程(NLS)^[6]来描述

$$i \left(\frac{da}{dt} + v_g \frac{da}{dz} \right) + \frac{1}{2} \omega_2 \frac{d^2 a}{dz^2} + \Xi |a|^2 a = 0 \quad (2)$$

其中

$$\Xi = \frac{c\Gamma}{2n} \left[3 - \left(\frac{n v_g}{c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, v_g , ω_2 和 Γ 分别表示群速度、群速度色散和非线性系数。经过化简得到

$$i \frac{da}{dt} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{d^2 a}{dz^2} + \gamma |a|^2 a = 0 \quad (4)$$

但此时 β_2 , γ 与光纤 NLS 中的含义不同,分别为 $\beta_2 = -\omega_2/v_g^3$, $\gamma = \Xi/v_g$ 。

利用分步傅里叶方法(SSF),模拟了高斯脉冲的传播。在计算中发现初始啁啾对光纤光栅中脉冲传播没有影响,完全可以忽略,这是因为初始啁啾远远小于光纤光栅强色散导致的啁啾。因此以下的计算没有考虑初始啁啾的影响。因为光纤光栅只有几厘米,同样也不必考虑损耗的影响。

3.1 强高斯脉冲的传输特性

在光强较低时,色散占据绝对优势,非线性不足以抵制色散效应,光脉冲在带外传播会经历极强的色散,从而导致脉冲展宽,这一点实验已经证实^[4]。计算结果如图 2 所示,横坐标表示相对脉宽,纵坐标

表示相对强度。

随着脉冲强度的增加,非线性效应显著增加。由图 3 可以看出,非线性抑制了色散导致的脉冲展宽,脉宽压缩,强度增大,基态孤子基本形成。

脉冲强度进一步增加,非线性占据优势,脉宽继续压缩,强度迅速增大,向二阶孤子演化,如图 4。

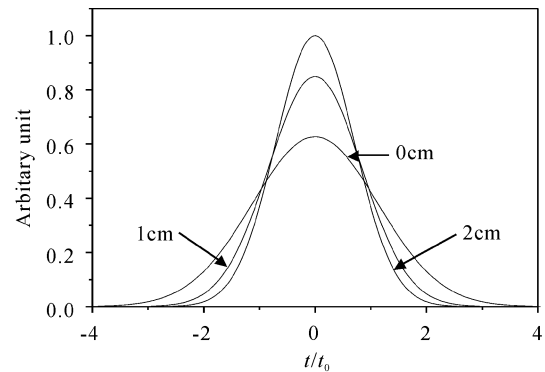


图 2 较低强度高斯脉冲在光纤光栅带外附近的传输
Fig. 2 Pulse shape at different distance with low input power

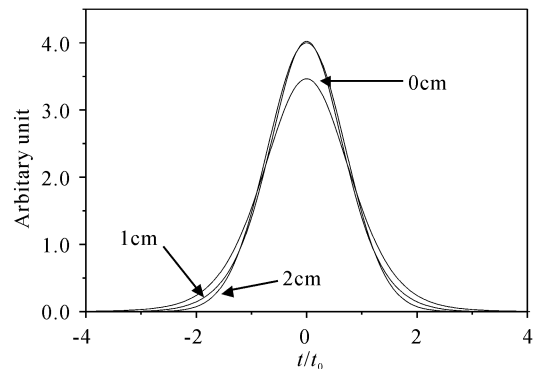


图 3 较高强度高斯脉冲在光栅中演化为基态孤子
Fig. 3 Pulse shape at different distance with middling input power

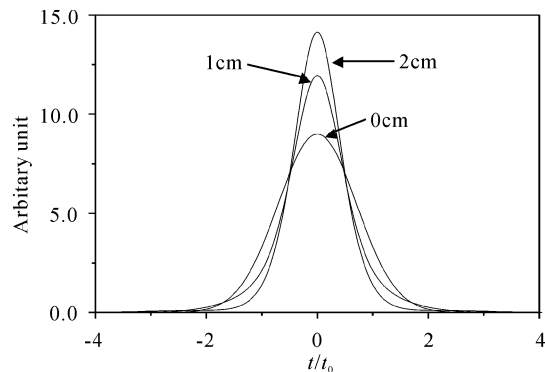


图 4 高强度高斯脉冲在光栅中的演化
Fig. 4 Pulse shape at different distance with strong input power

计算中发现,当初始输入高斯脉冲强度小于形成基态孤子强度时,不会演变为孤子;当初始脉冲强度大于形成基态孤子强度时,虽可以演变为孤子,但不会将多余能量耗散掉来形成基态孤子,而它的强度在作周期性的振荡。这是由于光纤光栅强烈的色散使得较小的非线性不能形成孤子,能量被色散掉,而对于较强的非线性,足以抑制色散,不会把多余能量色散掉,从而形成了振荡。而初始输入 sech 型脉冲时,满足光纤中孤子演化规律。

当脉冲强度增加到足够强时,在光纤光栅中形成了三阶孤子。在 0.5 cm 处,形成了极窄的脉冲,在 1.1 cm 附近分裂为两个对称的脉冲,然后又复原为窄脉冲,进一步恢复了初始状态,在 2 cm 内完成了一个周期,见图 5。值得注意的是,在输出端,脉宽得到了压缩,强度增大,脉冲形状偏离了初始入射的高斯型。同理,在更强的脉冲入射时,光纤光栅中完全可以形成更高阶孤子。

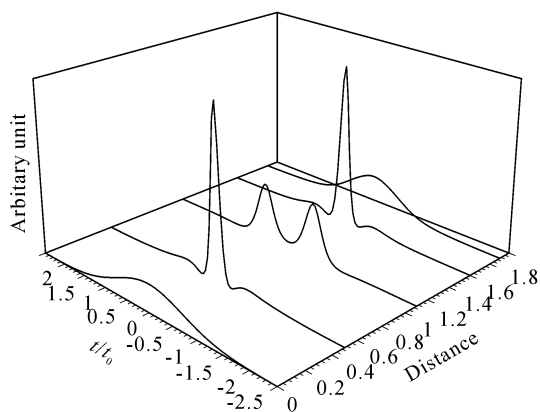


图 5 光纤光栅中强高斯脉冲向三阶孤子的演化

Fig. 5 Evolution of third-order soliton in fiber grating

需要指出的是,基态孤子形成的条件^[5,7] $P_0 = \frac{|k_2|}{\gamma T_0^2}$,是在初始脉冲为 sech 型情况下成立的,当初始脉冲形状偏离 sech 型时,该条件并不成立。在计算中发现,当输入为高斯型、超高斯型脉冲时,所需功率要大于 $P_0 = \frac{|k_2|}{\gamma T_0^2}$ 。在实验中应引起足够重视。

3.2 孤子传输的特点

光纤光栅带外孤子与光纤孤子具有相同的形成机理,但具有不同的特征:

- 1) 脉冲在光纤光栅中传播经历极强的色散,约为普通光纤的 $10^5 \sim 10^6$ 倍;需要强非线性才能抵制强的色散形成孤子,要求入射脉冲有非常高的功率;
- 2) 强的色散与非线性使形成孤子所需光纤光

栅长度很小,只需几厘米,因此,在极短的距离内可以实现光孤子及脉冲压缩,在未来应用中可以大大减小器件的尺寸,易于实现器件微型化与集成化;

- 3) 脉冲在光纤光栅带隙外群速度低于光纤中,在计算中仅为光纤中的 0.83 倍,理论上通过调节信号脉冲波长与 Bragg 波长之差可以得到任意速度的脉冲。利用这一特性,可以实现光复用的延时,而且可以动态地调节延时时隙;在利用光栅带外色散进行色散补偿、色散模拟时,由于脉冲速度低于光纤中,会产生延时效应,因此在系统设计时,必须考虑光栅的延时作用,在高速情况下尤为重要;当用于波分复用(WDM)系统时,由于不同波长脉冲拥有不同的速度,会引起不同信道间脉冲信号的时间抖动;

- 4) 光纤光栅具有可调谐特性。它的布拉格波长随温度、压力的变化而变化,这样,通过调节温度和压力可以调节布拉格波长,从而实现光纤光栅色散的可调谐性。这样,对于波长确定的脉冲,通过调节布拉格波长来获得所需的色散,从而改变色散与非线性的相互作用,可以得到不同的输出特性。在单信道中,利用非线性与色散的相互作用可以动态地调节脉冲的脉宽、强度。同样,通过调节布拉格波长,单个光纤光栅可以在密集波分复用(DWDM)系统中支持多信道孤子脉冲的传输和调节。

参 考 文 献

- 1 Dai Wutao, Guo Shuguang, Fan Yaxian *et al.*. External cavity semiconductor lasers with grating feedback for real-time Raman spectrum analyzer [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2001, **12**(11): 1112~1114 (in Chinese)
- 2 Tong Zhi, Jiang Zhong'ao, Yan Fengping *et al.*. DWDM all optical networks and the applications of the fiber Bragg grating in DWDM networks [J]. *Study on Optical Communications* (光通信研究), 2001, (1): 16~20 (in Chinese)
- 3 F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault. An all-fiber dense-wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4): 388~390
- 4 Li Jianxin, Xia Yuehui, Chen Xue *et al.*. Theoretical analysis and experimental investigation of dispersion compensation in transmission using uniform fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(7): 625~628 (in Chinese)
- 5 Li Jian-xin, Huang Yong-qing, Ren Xiao-min. The formation conditions of the fundamental grating solitons close to the photonic band gap in fiber gratings [J]. *Study on Optical Communications* (光通信研究), 2000, (4): 37~41 (in Chinese)
- 6 C. M. Sterke, N. G. Raphael Broderick, B. J. Eggleton. Nonlinear optics in fiber gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, **2**: 253~268
- 7 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 1989