

文章编号: 1001-3806(2015)02-0224-04

## 光强控制非线性布喇格光纤光栅慢光特性研究

陈建军<sup>1</sup>, 李林福<sup>2\*</sup>

(1. 新疆医科大学 医学工程技术学院, 乌鲁木齐 830011; 2. 贵州民族大学 信息工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 为了在光纤通信网络中控制光的传播速度以实现全光路由及全光缓存, 构建了耦合模传输模型, 采用含时推移变量的传输矩阵方法, 数值研究了光强控制下非线性布喇格光纤光栅(NLBG)的慢光特性。结果表明, NLBG 禁带位置具有强烈的光强依赖性, 入射光强的变化能够有效改变光的传输群速度, 对于输出脉冲未展宽的情况, 普遍可以得到 100ps 以上的输出脉冲时延, 且当入射光强一定时, NLBG 的长度变化对光的传播群速度也有显著的影响。

**关键词:** 光纤光学; 光纤光栅; 慢光; 群速度时延

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.017

### Investigation on the slow-light characteristics of nonlinear Bragg gratings based on optical power control

CHEN Jianjun<sup>1</sup>, LI Linfu<sup>2</sup>

(1. School of Medical Engineering, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China; 2. School of Information Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** To control the speed of light to achieve all-optical router and all-optical buffer in optical fiber communication network, the transmission model of coupled mode is constructed. By utilizing the modified time-domain transfer matrix method, the slow-light characteristics of nonlinear fiber Bragg gratings (NLBG) have been studied numerically based on optical power control. The results show that the photonic stopgap critically depends on the power of light and the variation of input power can effectively change the group velocity of light. Considering the case that the output pulse is not broadened, slow-light systems can generally obtain an output pulse delay time beyond 100ps. Furthermore, for the fixed input power, changing the length of NLBG can observably influence the group velocity of light.

**Key words:** fiber optics; fiber grating; slow-light; group velocity delay time

### 引 言

目前, 光纤通信网络内的数据交换与处理仍然是以光电转换和电光转换为主。由于电信号自身难以实现高速的数据处理, 且输出端口数据包竞争输出导致的丢失问题也是一个技术瓶颈<sup>[1]</sup>, 因此, 这些因素都会制约未来高速全光通信技术的发展。基于此, 开展与慢光有关的基础研究已成为推动新一代光电子器件发展的热点课题<sup>[2-15]</sup>。慢光效应主要是指光在传输过程中同媒质相互作用而产生的一种

反常的物理现象, 合理控制光脉冲的传播速度不仅可以实现全光交换与全光路由, 还能够实现可控全光缓存器, 具有非常高的实用价值。

随着全光通信网络技术的不断发展, 基于周期性结构的非线性布喇格光纤光栅 (nonlinear fiber Bragg gratings, NLBG) 慢光传输系统也相继被报道, 由于其能与光通信器件很好地兼容, 因此得到了广泛的关注<sup>[11-15]</sup>。MOK 等人于 2006 年在 30cm 长的 NLBG 对 680ps 的光脉冲实现了无脉冲展宽 3.2ns 的群时延, 归一化慢光时延达到了 5 个脉冲<sup>[11]</sup>; HOPMAN 等人采用光纤光栅将光波群速度减慢到真空中速度的 4%<sup>[13]</sup>; QIAN 等人于 2009 年采用抽运方式在 3.5cm 长的掺 Er/Yb 光纤光栅实现了 0.9ns 的群时延, 并成功将光波群速度降低至  $5.6 \times 10^7$  m/s 以内<sup>[15]</sup>。最近, MUÑOZ 等人利用光子晶体较大的群折射率变化实现了慢光传输, 并通过光致

基金项目: 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合 J 字 LKM[2012]23 号)

作者简介: 陈建军(1977-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事激光技术与光纤传感等方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: fulin369@126.com

收稿日期: 2014-03-24; 收到修改稿日期: 2014-04-30

间接光子转换方法为光隔离器、可调节光缓存器等的设计和实现提出了新的研究方向<sup>[5]</sup>。有效利用慢光技术可以对选定波长的光信息进行延时缓存与排序,同时还可避免数据丢失等问题。典型的光纤慢光传输系统受色散影响,其传输慢光会经历脉冲展宽与信号失真,从而限制慢光传输系统的带宽<sup>[10]</sup>。在高峰值功率密度情况下,当光波载波频率位于光纤光栅禁带内且紧靠禁带外沿时,自相位调制会平衡由光栅引起的反常色散,形成无展宽带隙孤子的慢光传输<sup>[11]</sup>。本文中基于非线性耦合模方程,采用考虑了时间推移变量的传输矩阵方法,数值分析了光强调节作用下非线性布喇格光纤光栅的慢光传输特性。

### 1 理论模型

在光纤光栅内,要考虑折射率的周期性变换和非线性变换,因此其折射率分布可描述为<sup>[6]</sup>:

$$n(z) = n_0 + n_1(z) \cos[2\beta_B(z)z + \Omega(z)] + n_2 |E(z)|^2 \quad (1)$$

式中,  $\beta_B(z)$  表示布喇格波数,  $\Omega(z)$  为依赖于空间位置的相移,  $E(z)$  为光栅内光场矢量的慢变振幅,  $n_0$  为光栅有效折射率,  $n_1(z)$  为光栅内折射率的周期性变换系数,  $n_2$  为非线性折射率系数。

注意到光纤光栅内有两种模式的光,且传输方向相反,考虑光场分布和 Maxwell 方程及光纤光栅内折射率的(1)式,可将频域解 Helmholtz 方程转化为时域解的耦合模方程。这里假设光栅内非线性响应是瞬时的,同时认为光波波长近似符合布喇格条件,最后得到的耦合模方程为<sup>[16]</sup>:

$$\partial E_+ / \partial z + (1/v_g) \partial E_+ / \partial t = i[\gamma(|E_+|^2 + 2|E_-|^2)E_+ + \delta\beta E_+ + \kappa E_-] \quad (2)$$

$$- \partial E_- / \partial z + (1/v_g) \partial E_- / \partial t =$$

$$i[\gamma(|E_-|^2 + 2|E_+|^2)E_- + \delta\beta E_- + \kappa E_+] \quad (3)$$

式中,  $E_+$  和  $E_-$  分别是光栅内正向和反向传输光场的慢变振幅;  $v_g = c/n$  为远离光栅禁带的群速度;  $\kappa = \pi n_1(z)/\lambda_B$  为线性耦合系数,  $\gamma = \pi n_2/\lambda_B$  为非线性参量;  $\lambda_B = 2n_0\Lambda$  ( $\Lambda$  为光栅周期) 代表满足布喇格条件时光的波长;  $\delta\beta(z) = \beta - \beta_B(z) = n_0\omega/c - \beta_B(z)$  表示频率的失谐量,  $\omega$  为光载波的中心角频率,  $c$  为真空中的光速度。

通过将(2)式和(3)式中时间微分项设置为 0, 使用 4 阶龙格-库塔法可得到光波场慢变振幅沿轴向的稳态输出变化。为了计算光栅在时域上的输入

输出特性,这里采用了修正的时域传输矩阵方法<sup>[9,17]</sup>:将光纤光栅长度等分为  $K$  段,用  $E_{+,i}(E_{-,i})$  及  $E_{+,i+1}(E_{-,i+1})$  分别表示第  $i$  段 ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) 正向和反向的光波场慢变振幅,则耦合模方程(2)式和(3)式可描述为:

$$\begin{bmatrix} E_{+,i+1}(t + \Delta t) \\ E_{-,i}(t + \Delta t) \end{bmatrix} = T_p T_c \begin{bmatrix} E_{+,i}(t) \\ E_{-,i+1}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,矩阵  $T_c$  和  $T_p$  分别代表传输矩阵中的耦合项和失谐项。考虑光纤光栅边界条件,使用时域传输矩阵方法,就可求得光场的整个输出状态。详细的解析推导过程见参考文献[9]。

### 2 结果与分析

为便于分析讨论,在以下的讨论中将初始失谐量  $\delta\beta$ 、输入光强  $I_i$  及输出光强  $I_o$  分别归一化为  $\delta\beta L, I_i/I_c$  和  $I_o/I_c$ , 其中  $I_c = 4\lambda_0/(3\pi n_2 L)$  为临界光强<sup>[18]</sup>,  $L$  表示整个光栅长度。计算中所用的数据如下:  $\lambda_B = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 1.46$ ,  $n_2 = 2.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $L = 1 \text{ cm}$ ,  $\kappa = 5 \text{ cm}^{-1}$ 。

#### 2.1 连续波强度变化对光纤光栅禁带及光波群速度的影响

图 1 中给出了在非线性效应影响下,连续入射波光强取不同值时光纤光栅的透射谱。图中的黑色粗实竖线表示载波频率的位置。从图中可以看出,当  $\gamma I_o = 0.5\kappa$  时,即对于入射光强较小的情况,非线性效应较弱,光栅禁带与线性情况一致,处于禁带内的光波被完全反射。随着入射光强的增加,当  $\gamma I_o$  值分别为  $3\kappa$  和  $8\kappa$  时,光强调节导致折射率的非线性增加,引起了布喇格波长的移动,这足以使载波频率部分或完全落在禁带外,形成了非线性开关效应。因此,可以通过改变入射光强来调节光栅禁带的位置,使处于禁带内且紧靠禁带外沿的光波得以透射。

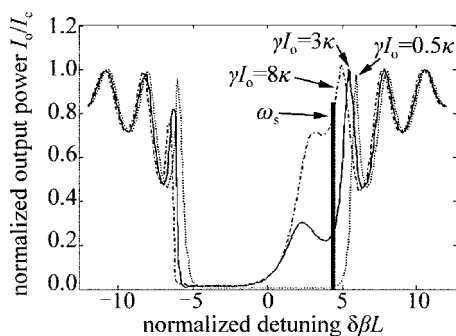


Fig. 1 NLBG transmission spectrum under different values of incident power

图 2 中给出了入射光强取不同值时,连续波在光纤光栅内的群速度随失谐量的变化。与图 1 相对应,黑色粗实竖线表示载波频率的位置,图中相对于零失谐量的对称曲线中间区域为禁带。从图中可以看出,当  $\gamma I_0 = 0.5\kappa$ ,即当入射光强较小时,非线性效应很弱,处于禁带内紧靠禁带外沿的光波被完全反射。随着入射光强的增大,光强非线性调节作用导致光波逐渐移出谐振范围并靠近禁带边沿,其群速度大小由  $v_{b,g} = 0$  增大至  $v_{b,g} \approx v_g$ 。在入射光强与耦合系数  $\kappa$  一定时,光波信号位于禁带外沿与布喇格谐振波长的失谐量  $\delta\beta L$  越小,光波的传输群速度越慢。这是因为失谐量越小,光波所受光栅色散效应越大,因而其传输群速度越小,在禁带边沿时,群速度为 0。但随着入射光强的增加,光强非线性调节作用使载波频率相对于布喇格谐振频率的失谐量逐渐增加,光波所受光栅色散效应减弱,其传输群速度将增加,当失谐量增加到足够大时,光波群速度达到  $v_{b,g} = c/n$ ,  $n$  为光栅折射率。因此,可以通过改变入射光强度来调节不同的失谐量来控制光波的传输群速度,达到慢光延迟的作用。

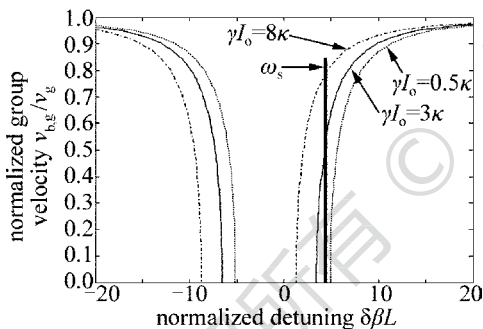


Fig. 2 Normalized group velocity vs. normalized detuning for different values of incident power

### 2.2 输入脉冲峰值功率变化对慢光时延特性的影响

图 3 所示为初始失谐量一定的情况下 ( $\delta\beta L = 4.50$ ),不同输入脉冲峰值功率所对应的输出脉冲形状。入射脉冲为脉宽 100ps 的高斯脉冲,图中的点虚线为输出参考脉冲。由图 3 可知,当  $I_i/I_c = 0.4$  时,归一化输出脉冲峰值仅为 0.14。表明入射脉冲峰值功率较低时,非线性效应不足以将脉冲中心频率移出禁带外,因此输出脉冲透射强度很小,但时延较大。考虑到此时靠近禁带边沿,光栅色散变得很大,脉冲显著加宽,导致脉冲不能形成孤子,从而限制了慢光传输带宽。当  $I_i/I_c$  分别为 0.5, 0.7 和 0.9 时,相应归一化脉冲峰值分别为 0.39, 1.32 和 2.04。这表明随着入射脉冲峰值功率的增加,非线性效应增

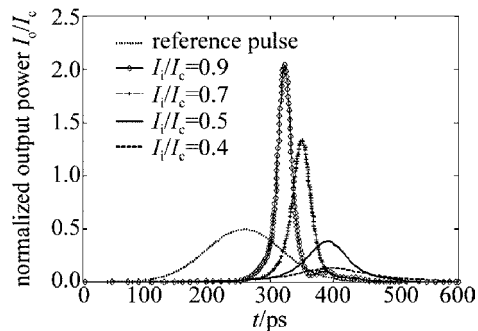


Fig. 3 Output pulses for different values of incident peak power, 逐渐将脉冲中心频率调节至禁带外,从而减弱了光栅色散,并减小了脉冲到达的时延,脉冲宽度变小。此时,自相位调制与光栅引起的反常色散共同作用可以形成带隙孤子。当归一化输入脉冲峰值功率达到 0.7 和 0.9 时,输出脉冲显著减宽。这是由于自相位调制和反常色散的联合作用导致的孤子压缩效应,使脉冲被压缩,形成孤子。

图 4 中给出了失谐量取不同值时,光纤光栅慢光时延随入射脉冲峰值功率的变化。从图中可以看出,当归一化注入功率  $I_i/I_c$  增加时,延迟时间  $\tau$  减小。说明随着入射脉冲峰值功率的增加,输出脉冲时延减小。考虑注入功率  $I_i/I_c = 0.5$  且失谐量为  $\delta\beta L = 4.50$  时脉冲未展宽的情况,可以得到接近 140ps 的脉冲时延,对应于群速度  $v_{b,g} = 0.21c/n$  (18% 的真空中的光速)。当注入功率  $I_i/I_c < 0.6$  时,对于不同的失谐量情况,普遍可以得到 100ps 以上的时延。但当入射脉冲峰值功率一定时,输出时延随着失谐量的增加而减小,且这种减小的趋势在较高峰值功率时会减弱。

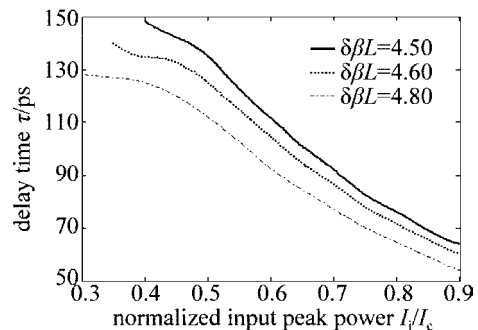


Fig. 4 Delay time versus incident peak power for different detuning

### 2.3 光纤光栅长度变化对脉冲慢光时延特性的影响

图 5 中给出了入射脉冲峰值功率一定时,不同光纤光栅长度所对应的输出脉冲时延变化。图中左侧的虚线为输出参考脉冲,右侧实线为延迟输出脉冲。考虑较短的光纤光栅长度情况下,光栅损耗可



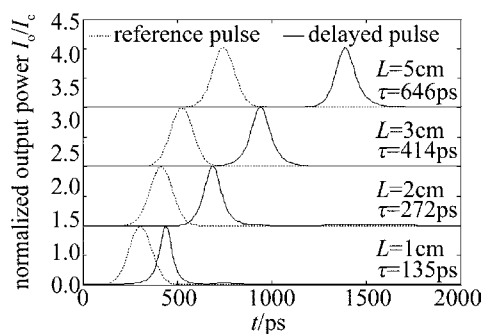


Fig. 5 Comparison of output pulses delay for different lengths of NLBG with the same incident peak power

以忽略。由图 5 可以看出,随着光栅长度的增加,对应的输出脉冲时延  $\tau$  近似成正比增大,且随着光栅长度的变化,输出脉冲形状并未改变。当光栅长度为 5cm 时,可得到时延为 646ps 的无展宽脉冲的输出。考虑光强导致的非线性效应,自相位调制能与光栅引起的反常色散共同作用形成带隙孤子,随着光栅长度的变化,脉冲仍能以无展宽的孤子的形式传播。

综上所述,在实际应用过程中,可根据需要合理的控制光强功率、失谐量和光栅长度,达到慢光传输系统的要求。

### 3 结 论

基于耦合模方程,利用含有时间推移变量的传输矩阵方法,研究了光强调节作用下非线性布喇格光纤光栅的慢光传输特性。研究表明:对于连续波入射,光强的增大可使原本处于禁带内的光波移出到禁带边缘处,从而减慢光波群速度,且失谐量与入射光强均会影响光波传输群速度的大小;对于脉冲入射,考虑输出脉冲未展宽的情况,输出脉冲时延可达到 100ps,此时对应的群速度为真空中光速的 18%。当入射脉冲峰值功率一定时,随着失谐量的增加,输出脉冲时延会减小,且输出脉冲时延正比于光栅长度。因此,在实际应用过程中,通过合理选择失谐量及光栅长度,可以在输出脉冲无展宽的前提下,利用入射光波功率的改变来控制 NLBG 内的传输时延。

### 参 考 文 献

[1] DAHAN D, EISENSTEIN G. Tunable all optical delay via slow and fast light propagation in a Raman assisted fiber optical parametric amplifier: a route to all optical buffering[J]. Optics Express, 2005, 13(16): 6234-6249.  
[2] DAI L, LI T, JING C. Wideband ultralow high-order-dispersion photonic crystal slow-light waveguide[J]. Journal of the Optical

Society of America, 2011, B28(7): 1622-1626.  
[3] KURT H, ERIM N, USTUN K. Slow light based on optical surface modes of two-dimensional photonic crystals[J]. Journal of the Optical Society of America, 2012, B29(6): 1187-1193.  
[4] VARMAZYARI V, HABIBIYAN H, GHAFOORIFARD H. All-optical tunable slow light achievement in photonic crystal coupled-cavity waveguides[J]. Applied Optics, 2013, 52(26): 6497-6505.  
[5] MUÑOZ M C, PETROV A Y, O' FAOLAIN L, et al. Optically induced indirect photonic transitions in a slow light photonic crystal waveguide[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(5): 053904.  
[6] WU J W, LUO F G. Slow light transmission of low power signal optical pulse in uniform periodic structure[J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 593-599 (in Chinese).  
[7] SENTHILNATHAN K, RAMESH BABU P, PORSEZIAN K, et al. Grating solitons near the photonic bandgap of a fiber Bragg grating[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2007, 33(2): 523-531.  
[8] QI Y F, HOU C L, BI W H. Theoretical and experimental research on fiber Bragg gratings in grapefruit photonic crystal fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0205004 (in Chinese).  
[9] CHEN J J, MURAT H, HU Y T. Theoretical investigation on bistable switching and dynamic characteristics of tapered nonlinear Bragg gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011(1): 010606 (in Chinese).  
[10] LENZ G, EGGLETON B J, MADSEN C K, et al. Optical delay lines based on optical filters[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(4): 525-530.  
[11] MOK J T, de STERKE C M, EGGLETON B J. Delay-tunable gap-soliton-based slow-light system[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 11987-11996.  
[12] MOK J T, IBSEN M, de STERKE C M, et al. Dispersionless slow light with 5-pulse-width delay in fibre Bragg grating[J]. Electronics Letters, 2007, 43(25): 1418-1419.  
[13] HOPMAN W C L, HOEKSTRA H, DEKKER R, et al. Far-field scattering microscopy applied to analysis of slow light, power enhancement, and delay times in uniform Bragg waveguide gratings[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1851-1870.  
[14] LIU H C, YARIV A. Grating induced transparency (GIT) and the dark mode in optical waveguides[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11710-11718.  
[15] QIAN K, ZHAN L, LI H, et al. Tunable delay slow-light in an active fiber Bragg grating[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 22217-22222.  
[16] EGGLETON B J, LENZ G, LITCHINITSER N M. Optical pulse compression schemes that use nonlinear pulse compression in Bragg gratings[J]. Fiber & Integrated Optics, 2000, 19(4): 383-421.  
[17] KIM B S, CHUNG Y, LEE J S. An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(7): 787-794.  
[18] MAITRA A, POULTON C G, WANG J, et al. Low switching threshold using nonlinearities in stopband-tapered waveguide Bragg gratings[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(10): 1303-1308.