

文章编号: 1002-2082(2008)06-0978-06

光纤 Bragg 光栅非线性开关动态特性研究

宋慧芳, 邱 昆, 武保剑, 彭拥军

(电子科技大学 宽带与光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要: 基于光纤 Bragg 光栅中脉冲演变遵循的非线性耦合模方程, 数值分析了光纤 Bragg 光栅在禁带附近由非线性光学特性导致的 Bragg 波长偏移。仿真结果表明: 随着输入信号功率的增大, 光栅的布拉格波长向长波方向移动, 反射峰值下降, 反射带宽变窄。进一步研究了基于此效应的全光自开关特性, 结果表明: 此开关的稳定时间短, 并且输出脉冲形状保持良好。因此, 这种具有高非线性系数的光纤光栅实现的全光开关在全光信号处理方面具有广泛的应用前景。

关键词: 光纤光栅; 非线性效应; 全光开关

中图分类号: TN253-34

文献标志码: A

Dynamic characteristics of FBG nonlinear switch

SONG Hui-fang, QIU Kun, WU Bao-jian, PENG Yong-jun

(MOE Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and
Communication Networks, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on the nonlinear coupled mode equation governing the pulse evolution in fiber Bragg gratings (FBG), the Bragg wavelength shift near the forbidden band caused by nonlinear optical characteristics was analyzed numerically. A simulation model was established to study the switching performance of FBG for different input powers. The simulation result shows that the Bragg wavelength of the grating moves to longer wavelength, the reflection peak decreases and the bandwidth becomes narrow when the input signal power increases. The characteristics of the all-optical switch based on this effect were investigated. And it shows that the stabilization period of the switch is short and the pulse wave-shape remains undistorted.

Key words: fiber grating; nonlinear effect; all-optical switch

引言

光纤光栅具有体积小、波长选择性好、带宽范围大、附加损耗小、响应速度快、易于与光纤系统连接等诸多优点, 被广泛用于光滤波器和色散补偿器件^[1-2]。目前光栅的应用领域主要在线性工作区域, 对光栅非线性的研究也大多考虑远离禁带时的情况。在这种情况下, 入射光功率较小, 非线性系数较低, 光栅很短, 非线性效应可以忽略, 但主动增大光纤光栅的非线性系数和增大的光功率, 却能实现光

纤光栅的光谱特性随输入光功率的变化, 从而实现光开关、光逻辑门、可调谐滤波器等全光信号处理器件。关于光纤光栅非线性的研究主要有以下几个重要的方面: 1) 窄带反射与高非线性结合会引起双稳态, 可以用作全光开关^[3-5]; 2) 色散与高非线性结合会引起孤子波和孤子, 孤子波在光栅中通过时通常会有较大的延时, 在光缓存方向有着潜在的应用价值^[6-7]; 3) 在非线性频率转换过程中, 光栅引起的色散还会影响相位匹配条件, 如二阶谐波产

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572008)

作者简介: 宋慧芳(1982—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事光纤通信全光信息处理器件方面的研究工作。

E-mail: hfsongfly@gmail.com

生^[8-9]和参量放大^[10-11]。

本文针对非线性特性对光纤布拉格光栅禁带的影响进行了研究,对光栅在非线性作用下所呈现的 Bragg 波长偏移特性作了理论分析,利用输入功率变化来改变 Bragg 波长的情况,并给出了相应的仿真结果,在此基础上提出了一种新的全光开关方案。与利用应力作用引起的 Bragg 波长偏移相比^[12],本文提出的非线性效应引起的 Bragg 波长偏移不需要电控调节,属于全光处理器件,处理速度很高,且结构更简单。

1 光纤光栅非线性耦合模理论与数值实验方法

光纤光栅是由紫外光直接写入到光纤纤芯的衍射光栅,纤芯折射率变化呈周期分布。折射率变化可以表示为

$$n(z) = n_{\text{eff}} + \Delta n(z) \cos[2\pi z/\Lambda + \varphi(z)] \quad (1)$$

式中: n_{eff} 表示光栅有效模折射率; $\Delta n(z)$ 表示折射率周期变化的幅度,也叫调制深度; $\varphi(z)$ 表示光栅中的相移; Λ 表示光栅空间调制周期,光栅的中心 Bragg 波长为 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$,在频域对应为 $\omega_B = (\pi c)/(n_{\text{eff}}\Lambda)$ 。

光纤布拉格光栅的电场由 2 个反向传播的 LP₀₁ 模式组成,其电场强度为

$$E(z, t) = F(x, y) [E_f \exp(-ik_B z) + E_b \exp(ik_B z)] \exp(-i\omega_0 t) \quad (2)$$

式中: E_f 和 E_b 分别为前向传输和后向传输的慢变振幅包络函数; ω_0 是光载波的中心频率。把方程(2)代入到麦克斯韦方程,并利用慢变包络近似,可以得到如下非线性耦合模方程(NLCME)^[13]:

$$\begin{aligned} i \frac{\partial E_f}{\partial z} + i \frac{n}{c} \frac{\partial E_f}{\partial t} + \delta E_f + \kappa E_b + \gamma (|E_f|^2 + 2|E_b|^2) E_f &= 0 \\ -i \frac{\partial E_b}{\partial z} + i \frac{n}{c} \frac{\partial E_b}{\partial t} + \delta E_b + \kappa E_f + \gamma (|E_b|^2 + 2|E_f|^2) E_b &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: δ 为光栅设计波长和输入波长之间的失谐量, $\delta = 2\pi n_{\text{eff}} (\frac{1}{\lambda_c} - \frac{1}{\lambda_B})$, κ 为耦合系数, $\kappa = \frac{\pi \Delta n(z)}{\lambda_B}$, κL 决定了耦合的总效果; γ 为非线性系数,反映了光纤折射率对光强的依赖关系,定义为 $\gamma = \pi n^{(2)}/(\lambda_B A_{\text{eff}})$ 。对于典型的光栅长度,本文忽略损耗。

本文选择图 1 所示的分段模型求解耦合模方

程。将整个光栅看成由 N_z 个等长度的子段串联而成,当 N_z 足够大时,可以认为每个分段中的电场强度是不变的,从而利用有限时域差分法计算光纤布拉格光栅在非线性影响下的光谱分布。

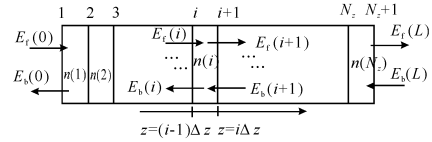


图 1 布拉格光纤光栅模型

Fig. 1 Simulation model of FBG

方程的物理边界条件为 $E_f(0) = E_{\text{in}}$, $E_b(L) = 0$ 。由于这样的双边边界条件求(3)式比较困难,故将方程的边界条件改为单边边界条件 $E_f(L) = E_{\text{out}}$, $E_b(L) = 0$ 。然后通过调整 E_{out} 的值,搜索逐步逼近的办法,使不同波长条件的输入 $E_f(0)$ 达到预设的 E_{in} ,同时也得到光栅输入端的反射强度 $E_b(0)$,从而可以得到光栅的反射系数 $R = E_b(0)/E_f(0)$ 。

2 数值结果与分析

2.1 非线性效应引起的反射光谱位移

当功率逐渐增大时, Bragg 波长会随光强的增大向长波方向移动,如图 2 所示(参数选择: $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$, $n_{\text{eff}} = 1.45$, $\Delta n_{\text{eff}} = 1.6 \times 10^{-4}$, 非线性系数 $\gamma = 0.4 \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$)。图 2 中实线表示线性光纤光栅的反射谱,光纤光栅在以 λ_B 为中心的范围内产生一个禁带,当信号波长处于禁带内时会被强烈反射^[14]。图 2 中虚线表示由于折射率随光强的增大而引起的非线性效应导致 Bragg 频移后的反射谱。可以看出,当强度较低的光信号通过光栅时,波长在 1550 nm 附近被反射,而随着信号强度的增加,原反射波长在非线性导致的固有波长频移后成为透射波长,而原高反射波长向长波方向移动。这是由于当入射光强足够大时,由非线性效应导致光纤的折射率与注入光强有如下关系:

$$n(I) = n_{\text{eff}} + n^{(2)}I$$

式中: I 为光强; $n^{(2)}$ 为克尔系数。此时光栅的中心 Bragg 波长为 $\lambda_B = 2n(I)\Lambda$,在频域对应为

$$\omega_B = (\pi c)/(n(I)\Lambda) \quad (4)$$

图 2 给出的 3 条反射谱曲线,分别对应着不同输入功率。其中,实线对应线性条件下光纤光栅的反射谱,点划线和虚线对应考虑了非线性效应,输入功率分别是 2 GW/cm^2 和 4.5 GW/cm^2 时的情况。由图 2 可以看出,随着入射功率的增大,光谱的

反射谱向长波方向移动,且光栅光谱的带宽越来越窄,反射率越来越低。

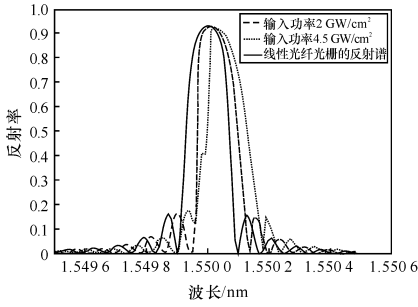


图2 均匀光纤光栅反射谱随功率变化图

Fig.2 Variation of reflection spectrum of fiber grating with input power

根据图2和(1)~(4)式对光纤光栅反射谱及其移动特性总结如下:

1) 光纤布拉格光栅的反射谱是一个近似正弦函数的分布,在谐振波长附近有一主峰,主峰周围分布若干边瓣。旁瓣可以用切趾技术来消除。

2) 光栅光谱的主峰反射率由光栅耦合系数和光栅长度决定。峰值反射率随 KL 的增大而增大,但变化率趋缓,当 KL 增大到一定量时,反射率不再增加,变化率趋于饱和。

3) 布拉格光栅光谱的带宽与折射率增量和光栅长度有关。随着折射率改变量的增加,光栅带宽增加,光栅长度越长,带宽越窄。对于强调制光栅,光栅长度对带宽影响较小,光谱带宽主要受制于折射率改变量。

4) 在非线性作用的影响下,布拉格光栅的反射峰值波长随功率的增大而增大,反射带宽的宽度变窄,反射率下降。

2.2 偏移特性分析

在上述研究工作的基础上,通过数值计算研究了光纤光栅 Bragg 波长随输入功率变化而变化的特性。仿真中测试的是光纤光栅的反射谱。选用均匀布拉格光纤光栅,光纤光栅的固有 Bragg 波长为 1 550 nm,光栅长度分别为 8 mm 和 10 mm,非线性系数 $\gamma=0.4 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ 。图3~图5为输入功率不断增加时光纤光栅光谱变化的仿真结果和由此结果得出的线性拟合曲线。在仿真中不断增加输入功率的幅度,观察光纤光栅反射谱的变化情况。由图3可以看出,当输入功率逐渐增大时,光栅

Bragg 波长逐渐向长波方向移动,当功率增加到 5 GW/cm^2 时,Bragg 波长已移到 1 550.23 nm,与初始波长相比,波长偏移了 0.23 nm,获得了 0.23 nm 的可调谐范围。由图3中还可以看出,8 mm 的光栅比 10 mm 光栅的偏移范围要小,这是由于通过光栅的距离较短,非线性作用较小造成的。

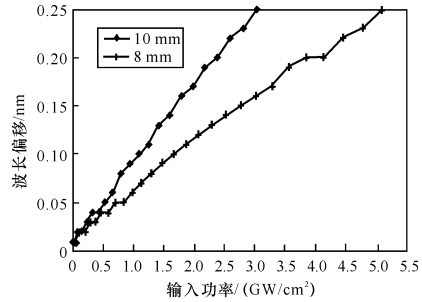


图3 Bragg 波长随光功率变化曲线

Fig.3 Variation of Bragg wavelength with luminous power

在波长向长波方向移动的同时,布拉格光栅的峰值反射率在不断地减小(图4),禁带宽度也越来越小(图5)。图中上下2条曲线分别是光栅长度为 10 mm 和 8 mm 时的情况,由图4可以看出在其他条件相同的情况下,10 mm 的光栅反射率比 8 mm 的要高很多,而且对功率的影响更敏感。

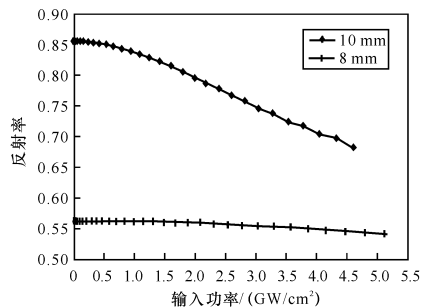


图4 光纤光栅峰值反射率随光强变化曲线

Fig.4 Variation of FBG peak reflectivity with light intensity

由以上分析可见,光纤光栅的非线性系数和输入光信号的强度是获得较大偏移量的关键。在实际应用中,输入功率自然是越小越好,因此要获得更大的偏移,就必须考虑如何增强光纤光栅的非线性特性。

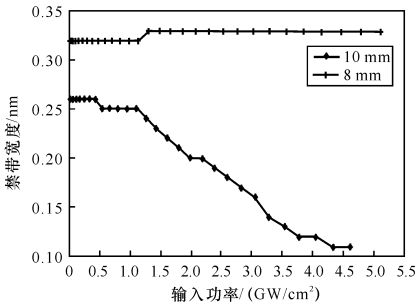


图5 光纤光栅禁带宽度随光强变化曲线

Fig. 5 Variation of FBG forbidden band width with light intensity

3 基于光纤光栅非线性效应的全光开关

选择入射光的光波位于光栅带隙的禁带内,开始时入射光不能通过光栅。依据三阶非线性光学效应,非线性介质的折射率与泵浦光强成正比关系。在泵浦光的作用下,非线性材料的折射率增大,使得光栅的有效折射率增加,光栅带隙向长波方向移动。此时,入射光位于光栅的导带,能够通过光栅。同样,选择入射光的光波位于光栅带隙长波带边,开始时,入射光可以透过光栅,随着入射光强的增大,光栅带隙向长波移动之后,入射波位于光栅的禁带,不能通过光栅。这样,通过入射光的激发作用,使光子带隙发生迁移,从而可实现对探测光传输过程的开、关控制作用。

3.1 开关稳定时间

通过测量反射光的强度随输入光之间的时间延迟变化关系,得到光开关的时间响应在几百皮秒左右,如图6所示。图6中上下2幅图,分别是输

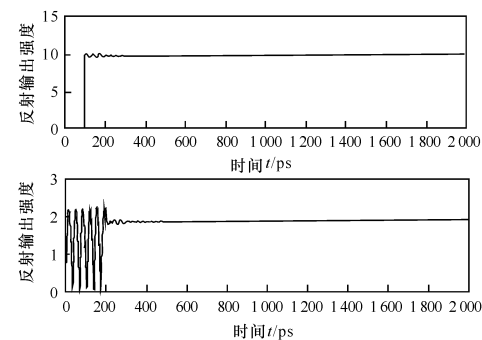


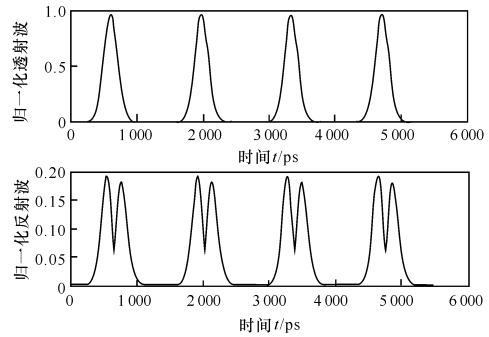
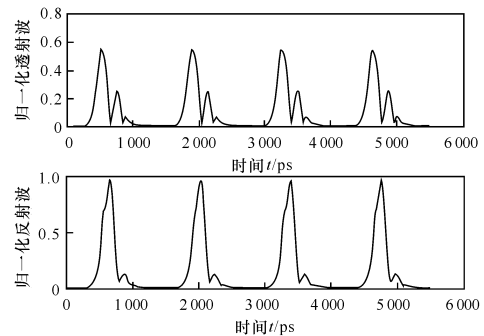
图6 基于光栅的全光开关稳定时间

Fig. 6 Stabilization time of all-optical switch based on FBG

入功率为 0.5 GW/cm^2 时线性和非线性情况下,连续波输入时反射波随时间的变化关系,由图可以看出,线性情况下开关的响应时间(约为 250 ps)比非线性情况下的开关响应时间(约为 660 ps)相对要短。

3.2 开关动态分析

根据(3)式,采用动态仿真,借助脉冲宽度为 200 ps 的光输入,利用非线性光学效应使光子带隙发生移动,实现了时间响应较短的全光开关。图7和图8分别给出了均匀光栅情况下,脉冲峰值功率分别为 $5 \times 10^{-5} \text{ GW/cm}^2$ 和 2 GW/cm^2 , 高斯脉冲入射时线性和非线性情况下的反射和透射输出。

图7 脉冲峰值功率为 $5 \times 10^{-5} \text{ GW/cm}^2$ 时,高斯输入脉冲的归一化反射和透射输出脉冲Fig. 7 Normalized reflection and transmission output pulses of Gauss input pulse as peak power of pulse is $5 \times 10^{-5} \text{ GW/cm}^2$ 图8 脉冲峰值功率为 2 GW/cm^2 时,高斯输入脉冲的归一化反射和透射输出脉冲Fig. 8 Normalized reflection and transmission output pulses of Gauss input pulse as peak power of pulse is 2 GW/cm^2

$$E(t) = \exp[-0.5(t/T_0)^2] \quad (5)$$

式中 T_0 为脉冲的半高宽,选用 $T_0 = 100$ ps,输入波长为 $1\ 550.1$ nm。

图 7 上下 2 图分别表示输入脉冲功率为 5×10^{-5} GW/cm² 时的归一化透射和反射脉冲。高斯脉冲的脉冲峰值功率低,非线性效应可以忽略,由于入射波长 ($1\ 550.1$ nm) 与光栅布拉格波长 ($1\ 550$ nm) 不对应,处于光栅的透射通带,因此入射脉冲大部分通过光栅。

当入射脉冲的光功率较强时,(3) 式中的非线性效应就不能忽略,图 8 中输入的高斯脉冲峰值为 2 GW/cm²。由图中可以清楚地看出,输出的脉冲波形与图 7 相比已有了很大差别,光脉冲在较短的距离就能够大部分耦合到反射脉冲,反射率可达 85%,大部分能量被反射。这是因为输入功率增加引起的非线性作用,使光栅中心 Bragg 波长向长波长方向偏移,原来处于透射通带波长 $1\ 550.1$ nm 转变为透射阻带。

由图 7 和图 8 可以得出以下结论: 1) 线性条件下,由于色散效应,脉冲在光纤内传输时被一定程度地展宽(约为 170 ps),但考虑光栅的非线性效应以后,随着脉冲强度的增加,非线性效应显著增加。非线性抑制了色散导致的脉冲展宽,脉宽压缩(约为 20 ps),强度增大。如果功率选择得当,可以使非线性导致的压缩和色散导致的展宽正好抵消,使输出的脉冲形状基本不变; 2) 每个脉冲都趋向于一个恒定的宽度,虽然前沿附近的脉冲没有足够的传输时间来稳定其宽度,但其形变并不是很明显,也就是说,脉冲在光栅内可以很快稳定传输。

由上述分析知,当输入光功率较低时,处于光栅反射禁带外的 $1\ 550.1$ nm 的输入脉冲将透过光栅输出,而随着输入光功率的增大,在非线性的作用下,由于反射谱整体向长波长方向偏移,原来处于透射通带的波长 $1\ 550.1$ nm 移动到透射阻带,输入脉冲被反射,从而实现了全光开关。

4 结论

利用光栅非线性耦合模方程分析了光纤布拉格光栅 Bragg 波长随功率增加变化的特性,并用传输矩阵法研究了短脉冲在布拉格光栅中的传输特性,比较了不同长度光栅下的波长偏移特性。通过光放大器对输入信号功率的调节,实现对光纤布拉格光栅固有波长的调节,从而实现了全光开关并且

使脉冲形状保持很好。观察到了脉冲频谱明显展宽现象,在此基础上进一步分析表明,此全光开关同时还具有波长变换的功能。可以想见,光纤光栅以其可控的非线性特性将在光器件制作应用中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [2] 乔学光,李婷,王宏亮. 耐高温光纤 Bragg 光栅的响应特性研究[J]. 应用光学,2007,28(2):209-211. QIAO Xue-guang, LI Ting, WANG Hong-liang. Response characteristics of high temperature resistant fiber Bragg grating[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2):209-211. (in Chinese)
- [3] JIN Jing, CAI Wang-yang, WEN Shuang-chun. Performance of all-optical switching in long period fiber grating[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering: Passive Components and Fiber-based Devices II, Shanghai, 2005.
- [4] ZHENG Jia-jin, ZHANG Gui-lan. All-optical switching and nonlinear optical properties of HBT in ethanol solution[J]. Chinese Physics, 2007, 16(4): 1047-1051.
- [5] MOK J T, De STERKE M. Dispersionless slow light using gap solitons[J]. Nature Physics, 2006 (2):775-780.
- [6] MISAS C J, PETROPOULOS P, RICHARDSON D J. Slowing of pulses to $c/10$ with subwatt power levels and low latency using Brillouin amplification in a bismuth-oxide optical fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007,25(1):216-221.
- [7] EGGLETON B J, STEPHENS T. Dispersion compensation using a fibre grating in transmission[J]. Electronics Letters,1996,32(17):1610-1611.
- [8] BELYAKOV V A. Diffraction optics of complex-structured periodic media [M]. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [9] STEEL M J, De STERKE C M. Second harmonic generation in second harmonic fiber gratings [J]. Applied Optics, 1996,35(18):3211-3219.
- [10] ZHOU G T, XU K, WU J. Self-pumping wavelength conversion for DPSK signals and DQPSK generation through four-wave mixing in highly nonlinear optical fiber [J]. Photonics Technology

Letters, 2006, 18(22): 2389-2391.

- [11] WANG Yan, YU Chang-yuan. Tunable all-optical wavelength conversion and wavelength multicasting using orthogonally polarized fiber FWM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(10): 3331-3338.
- [12] 郭威, 刘凯, 黄永清, 等. 应力作用下光纤光栅 Bragg 波长调谐特性的研究[J]. 光电子激光, 2000, 11(1): 23-25.
- GUO Wei, LIU Kai, HUANG Yong-qing, et al. Study on fiber grating's Bragg wavelength shift caused by strain[J]. Journal of Optical Electronics & Laser, 2000, 11(1): 23-25. (in Chinese)
- [13] 周次明, 陈留勇. 倾斜 Bragg 光纤光栅反射谱特性理论和实验研究[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 576-580.
- ZHOU Ci-ming, CHEN Liu-yong. Theoretical and experiment research on reflection spectrum characteristic of tilted fiber Bragg grating [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6): 576-580. (in Chinese)
- [14] BAUM O I, SOKOLOV V I. Design of Bragg grating filters with improved spectral characteristics[J]. SPIE, 2002, 4644: 511-519.