

啁啾的引入对线性负切趾型布拉格光栅 双稳特性的影响^{*}

田剑锋 吴正茂 夏光琼[†]

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2006 年 4 月 3 日收到, 2006 年 6 月 16 日收到修改稿)

基于耦合模理论, 对线性负切趾型布拉格光栅中引入啁啾后其双稳特性的变化进行了研究. 结果表明: 引入正啁啾有利于改善线性负切趾型布拉格光栅的双稳态性能. 通过合理选择正啁啾、线性负切趾型布拉格光栅的长度, 可对其双稳态性能进行进一步优化.

关键词: 啁啾, 线性负切趾布拉格光栅, 双稳

PACC: 4265P A270Q A281W

1. 引 言

非线性布拉格光栅(NLBG)以其独特的优点成为现代光纤通信领域中一种重要的光学元件^[1-3]. 在光子“禁带”之外的高失谐端, 表现出非常大的反常群速度色散, 由此形成的慢布拉格孤子在光脉冲压缩方面有潜在的应用价值^[4-6]; 在光子“禁带”之内, 内部光强、非线性折射率变化、布拉格谐振频率间存在的正反馈机制使之表现出双稳效应^[7-9]. 近年来, 人们试图通过切趾、相移、啁啾以及非线性折射率缓变技术使之在开关阈值、开关速度、对比度以及动态稳定性等方面的性能得到不断改进^[10-14]. 在文献[15]中, 我们对线性切趾型布拉格光栅的双稳特性进行了研究. 本文在此工作的基础上, 提出一种可进一步提高线性负切趾型布拉格光栅双稳特性的方案. 研究结果表明: 在线性负切趾型布拉格光栅中引入正啁啾, 可以改善其双稳特性; 另外, 通过调整光栅的长度, 可使其性能得到进一步的优化.

2. 理论模型

考虑一光纤光栅, 其轴向沿 z 方向, 其折射率分布为

$$n(z) = n_0 + n_1(z) \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right] + n_2 |E(z)|^2, \quad (1)$$

式中, $E(z)$ 为光栅内部电场振幅, Λ 为布拉格周期, $\phi(z)$ 为光栅中的相移, n_0 , $n_1(z)$ 和 n_2 分别为光栅平均折射率、折射率周期变化振幅和非线性克尔系数. 光栅内传播的电场可以写作

$$E = A_f \exp[i(\beta_0 z - \omega t)] + A_b \exp[-i(\beta_0 z + \omega t)], \quad (2)$$

式中, ω 为光载波的中心角频率, t 为时间, $\beta_0 = \pi/\Lambda$ 为布拉格波数, A_f 和 A_b 分别是光栅中前向和后向波的振幅慢变包络函数. 在本文的计算中, 只考虑入射波为连续波或准连续波的情况. 把(2)式代入波动方程并结合(1)式, 忽略光纤的损耗及材料色散(假定 NLBG 的介质为无抽运的掺铒光纤, 虽然该材料在 1.55 μm 窗口有较大的损耗和色散, 由于计算中所选光纤的长度为厘米量级, 因此其损耗及色散可以忽略), 并假设材料非线性响应速度特别快、载波波长相接近光栅的布拉格波长, 就可得到如下非线性耦合模方程^[5]:

$$\frac{\partial A_f}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_f}{\partial t} = [i\delta A_f + \Gamma(|A_f|^2 + 2|A_b|^2)A_f + kA_b], \quad (3a)$$

^{*} 重庆市自然科学基金(批准号 2005BB3099)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

$$\frac{\partial A_b}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_b}{\partial t} = - [\delta A_b + \Gamma(|A_b|^2 + 2|A_r|^2)A_b + k^* A_r], \quad (3b)$$

式中, v_g 为光在光栅中传播的群速度, δ 为失谐量, Γ 为非线性系数, k 为耦合系数. δ , Γ 及 k 可分别表示为

$$\begin{aligned} \delta &= \beta - \beta_0 = n_0 \frac{\omega}{c} - \beta_0, \\ \Gamma &= \frac{2\pi n_2}{\lambda_0}, \\ k(z) &= \frac{\pi n_1(z)\eta}{\lambda_0} \exp[i\varphi(z)], \end{aligned} \quad (4)$$

式中, c 为真空中的光速, $\lambda_0 = 2n_0 L$ 为布拉格波长, η 为限制因子. 对于线性切趾型光栅, k 可表示为^[13]

$$k(z) = k_0 [1 + \Delta k(z - L/2)/L]. \quad (5)$$

这里, L 为光栅的总长度, k_0 为光栅中心处的耦合系数, Δk 为表征耦合系数变化快慢的切趾参数, Δk 的值为正数时表示正切趾, Δk 的值为负数时表示负切趾.

对于加入啁啾的光纤光栅, 其布拉格波数 β_0 将随轴向变化, 可表示为^[13]

$$\beta_0(z) = \bar{\beta}_0 + \frac{C}{L^2} \left(z - \frac{L}{2} \right)^2, \quad (6)$$

式中, $\bar{\beta}_0$ 为平均布拉格波数, C 值的正和负分别对应于正啁啾和负啁啾, C 值的大小表示 $\beta_0(z)L$ 总的变化. 对于小数量的啁啾, 耦合模方程的形式不变, 只是失谐量 δ 将沿轴向发生变化.

慢变振幅在边界处满足下列边界条件. 当 $z=0$ 时,

$$\begin{aligned} A_i(0, t) &= A_r(0, t), \\ A_t(0, t) &= A_b(0, t); \end{aligned} \quad (7a)$$

当 $z=L$ 时,

$$\begin{aligned} A_b(L, t) &= 0, \\ A_i(L, t) &= A_t(L, t). \end{aligned} \quad (7b)$$

这里, A_i , A_r 和 A_t 分别为入射波、反射波和透射波的慢变振幅.

在(3a)(3b)式中, 令对时间的偏导数为零, 得到稳态时慢变振幅沿轴向的变化方程. 结合边界条件(7a)(7b)式, 借助四阶龙格-库塔法可进行数值求解, 从而可对其双稳特性进行研究.

3. 结果及讨论

在计算过程中, 所有的数据为^[15] $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$,

$n_0 = 1.46$, $n_2 = 6.9 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$, $\eta = 0.8$. 为了方便讨论, 以下将输入光强 I_i 、输出光强 I_t 分别对 I_c 进行归一化, 其中

$$I_c = 4\lambda_0(3\pi n_2 L)$$

为入射临界光强^[13].

3.1. 啁啾对线性负切趾型布拉格光栅双稳特性的影响

图 1 给出了 $\Delta k = -1$ 的线性切趾型布拉格光栅中引入啁啾时其稳态输入-输出曲线, 曲线 a、曲线 b、曲线 c、曲线 d、曲线 e 分别对应 $C = 5, 2, 0, -2, -5$. 其他参数分别为 $\delta L = 2.5$ (此时入射光位于光子“禁带”边缘), $k_0 = 3 \text{ cm}^{-1}$, $L = 1 \text{ cm}$. 从图 1 可以看出: 在线性负切趾型布拉格光栅中引入负啁啾会导致开关阈值增大, 双稳环宽度随着负啁啾量的增大而急剧减小直至双稳现象消失, 而引入正啁啾随着啁啾量的增加, 双稳环的上支变得更加平坦, 双稳环宽度无明显变化, 开关对比度逐渐减小, 但是双稳开关阈值显著降低. 因此, 引入正啁啾有利于改善线性负切趾型布拉格光栅的双稳态性能.

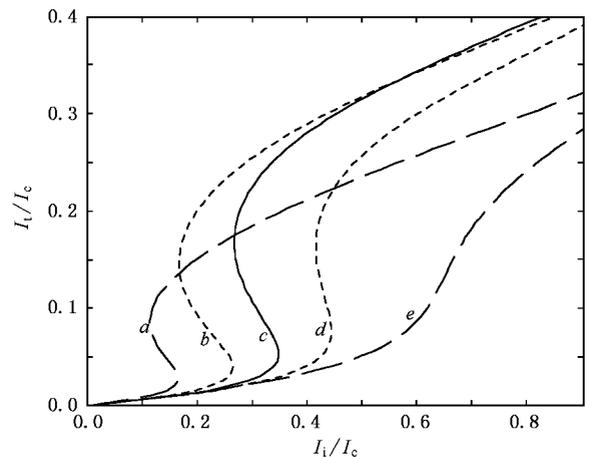


图 1 线性负切趾型布拉格光栅中引入不同啁啾量时的稳态输入-输出曲线. 其中曲线 a、曲线 b、曲线 c、曲线 d、曲线 e 分别对应 $C = 5, 2, 0, -2, -5$

图 2 和图 3 分别给出了当失谐量取不同值时, $C = 0$ (无啁啾) 和 $C = 5$ 的线性负切趾型布拉格光栅的稳态输入-输出曲线. 图中所用其他数据与图 1 相同. 从图 2 可以看出, 如果不引入啁啾 ($C = 0$), 开启双稳环的最大失谐量 $\delta L = 3$, 当双稳环的开启光强为入射临界光强的 0.6 倍时, 对应的失谐量 δL 值大

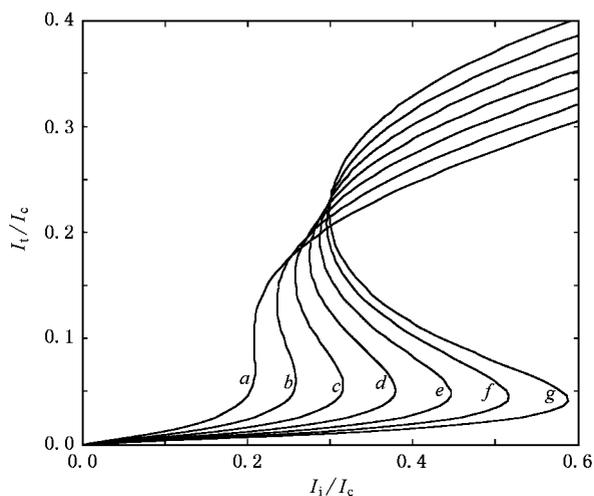


图 2 无啁啾、线性负切趾型布拉格光栅的稳态输入-输出曲线
曲线 a : $\delta L = 3.0$, 曲线 b : $\delta L = 2.8$, 曲线 c : $\delta L = 2.6$, 曲线 d : $\delta L = 2.4$, 曲线 e : $\delta L = 2.2$, 曲线 f : $\delta L = 2.0$, 曲线 g : $\delta L = 1.8$

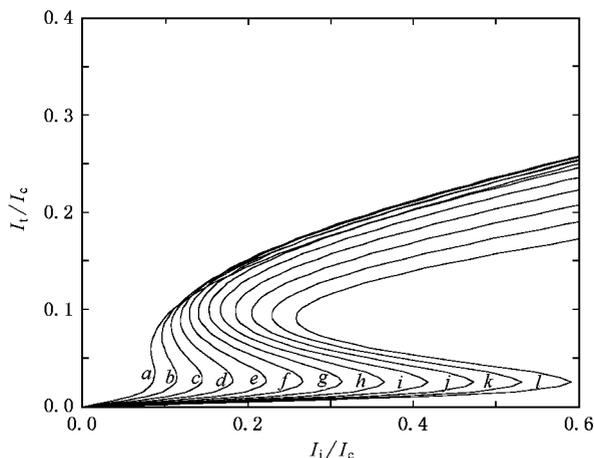


图 3 正啁啾、线性负切趾型布拉格光栅的稳态输入-输出曲线
曲线 a : $\delta L = 3.0$, 曲线 b : $\delta L = 2.8$, 曲线 c : $\delta L = 2.6$, 曲线 d : $\delta L = 2.4$, 曲线 e : $\delta L = 2.2$, 曲线 f : $\delta L = 2.0$, 曲线 g : $\delta L = 1.8$, 曲线 h : $\delta L = 1.6$, 曲线 i : $\delta L = 1.4$, 曲线 j : $\delta L = 1.2$, 曲线 k : $\delta L = 1.0$, 曲线 l : $\delta L = 0.8$

约为 1.8 (曲线 g 所示)。如果引入啁啾 ($C = 5$) ,如图 3 所示 ,开启双稳环的最大失谐量 $\delta L = 3\lambda$ 与无啁啾时相同 ,但当双稳环的开启光强为入射临界光强的 0.6 倍时 ,双应的失谐量 δL 值大约为 0.8 (曲线 l 所示) 。因此 ,在线性负切趾型布拉格光栅中引入正啁啾后能产生双稳现象的入射光波长范围将明显增大。

通过比较图 2 和图 3 的结果还可以得到 :对于同一频率的入射光 ,即失谐量一定的情况下 ,正啁啾的引入虽然使双稳环的开关对比度降低 ,但却使双

稳的开关阈值明显降低 ,上支变得更为平坦。对于以上现象 ,从物理上可解释为 :啁啾的引入使原来光栅中的布拉格波数沿轴向发生变化 ,从而有较多的入射光满足布拉格条件经历谐振 ,因而加宽了能产生双稳的入射光波长范围。但是 ,布拉格波数沿轴向发生变化使同一频率的入射光谐振次数减少 ,因而光栅内部反馈减弱 ,导致双稳环上支透过率降低 ,最终使开关对比度减小。

综上所述 ,在线性负切趾型布拉格光栅中引入正啁啾 ,将有利于降低开关阈值、使双稳环的上支变得平坦并扩大能实现双稳的入射光波长范围。

3.2. 光栅长度变化对正啁啾、线性负切趾型布拉格光栅双稳特性的影响

图 4 给出了光栅长度分别取不同值时 ,正啁啾、

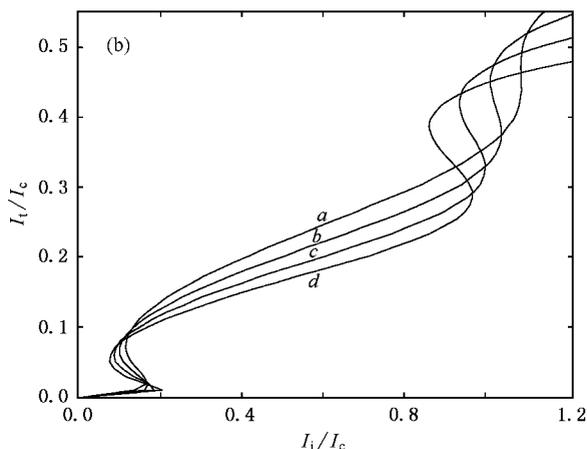
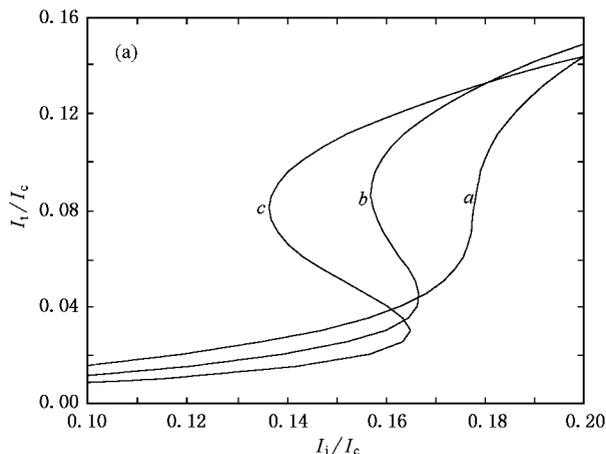


图 4 光栅长度取不同值时正啁啾、线性负切趾型布拉格光栅的稳态输入-输出曲线 (a)图中曲线 a : $L = 0.8$ cm, 曲线 b : $L = 0.9$ cm, 曲线 c : $L = 1.0$ cm (b)图中曲线 a : $L = 1.1$ cm, 曲线 b : $L = 1.2$ cm, 曲线 c : $L = 1.3$ cm, 曲线 d : $L = 1.4$ cm

线性负切趾型布拉格光栅的稳态输入-输出曲线,计算中取 $\Delta k = -1$, $C = 5$, $\delta = 250 \text{ cm}^{-1}$. 图 4(a)中的曲线 a、曲线 b、曲线 c 分别对应光栅长度 L 取 0.8, 0.9, 1.0 cm. 图 4(b)中的曲线 a、曲线 b、曲线 c、曲线 d 分别对应光栅长度 L 取 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 cm. 从图 4 可以看出, 当光栅的啁啾和切趾确定以后, 光栅长度对双稳的开关阈值、环的宽度和开关对比度等都有较大的影响. 当 L 较小 ($L < 0.8 \text{ cm}$) 时, 没有双稳现象产生. 当 L 较大时, 将出现双稳, 并且随着 L 的增大双稳环的宽度将逐渐增加, 开启阈值逐渐减小, 开关对比度增大. 当 L 增大到一定时, 将出现两个双稳区域 (见图 4(b)). 新增加的双稳区位于临界光强附近. 因此, 通过合理选择光栅长度可对其双稳性能进行进一步的优化.

4. 结 论

利用耦合模理论数值研究了在线性负切趾型布拉格光栅中引入啁啾后其双稳特性的变化. 结果表明, 在线性负切趾型布拉格光栅中加入正啁啾将有利于降低双稳环开关阈值、扩大能够实现双稳的入射光波长范围并使双稳环的上支变得更为平坦. 因此, 通过引入适当的正啁啾, 将有利于改善线性负切趾型布拉格光栅的双稳性能. 另外, 光栅长度对正啁啾、线性负切趾型布拉格光栅的双稳开关阈值、环的宽度、开关对比度等都有明显的影响. 当光栅长度过短时没有双稳现象产生, 当光栅过长时将出现两个双稳区域. 因此, 在实际应用中需合理选择光栅的长度.

-
- [1] Bloembergen N 2000 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **6** 876
- [2] Tavermer D, Broderick N G R, Richardson D J *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 328
- [3] Johnson E, Sargent E H 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 1388
- [4] Christodoulides D N, Joseph R I 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 1746
- [5] Eggleton B J, Lenz G, Litchinitser N M 2000 *Fiber Integrated Opt.* **19** 383
- [6] Broderick N G R, Millar P, Richardson D J *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 740
- [7] Janyani V, Paul J D, Vukovic A *et al* 2004 *IEE Proc. Optoelectron.* **151** 185
- [8] Lee H, Agrawal G P 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 508
- [9] Brzozowski L, Sargent E H 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 550
- [10] Agrawal G P, Radic S 1994 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6** 995
- [11] Radic S, George N, Agrawal G P 1994 *Opt. Lett.* **19** 1789
- [12] Radic S, George N, Agrawal G P 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 671
- [13] Radic S, George N, Agrawal G P 1995 *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 1326
- [14] Logvin Y A, Volkov V M 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 774
- [15] Jia X H, Wu Z M, Xia G Q 2004 *Opt. Express* **12** 2945

Influence of introducing chirp on bistable characteristics of linear negative tapered Bragg gratings^{*}

Tian Jian-Feng Wu Zheng-Mao Xia Guang-Qiong[†]

(*School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

(Received 3 April 2006; revised manuscript received 16 June 2006)

Abstract

Based on the coupled mode theory, the influence of introducing the chirp on the bistable characteristics of linear negative tapered Bragg gratings is investigated. The results show that introducing positive chirp improves the bistable performance of linear negative tapered Bragg gratings, and the bistable performance can be further optimized by reasonably selecting the length of the linear negative tapered Bragg gratings with positive chirp.

Keywords : chirp, linear negative tapered Bragg gratings, bistability

PACC : 4265P, 4270Q, 4281W

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant No. 2005BB3099).

[†] Corresponding author. E-mail: gxia@swu.edu.cn