

光纤光栅双稳态光开关和数字光信号放大*

张 颖

(信息产业部电信科学技术研究院通信技术发展研究中心 北京 100083)

提要 提出掺铒光纤光栅双稳器件可作为低功率高速全光开关和全光数字信号放大器,并可沿光纤一维集成。分析了这类器件的工作原理、特性和参数,确定了器件的设计原则。

关键词 光纤光栅, 光学双稳态器件, 光信号放大

1 引 言

由于光学双稳器件(OBD, Optical Bistability Device)在全光数据开关^[1]、全光信号放大^[2]、光脉宽压缩和信号整形^[3]、全光信号再生^[4]等许多信号处理功能中的应用前景,这类器件的研制已越来越受到人们的重视。利用光纤作为非线性介质的光纤双稳器件的研制成功,使这种器件对光纤通信向高速大容量的全光通信发展,又多了一条可供探索的途径。而且,由于光双稳器件可以在放大光脉冲的同时,完成信号的脉宽压缩和整形^[3],因而可同时补偿光纤长途传输线路上因光纤吸收而造成的信号衰减和系统色散而造成的脉冲展宽,实现全光数字信号再生,这样就使它较其他全光通信方式更具诱人特点。

掺铒光纤具有比普通光纤约高 4 个量级的非线性折射率(Kerr 系数) n_2 ^[5], 光纤又具有横向尺寸小、纵向尺寸大的特点,因而掺铒光纤双稳器件完全可以在光纤通信功率水平上运转。我们已完成了掺铒光纤双稳态^[6,7]和双稳光开关^[8]的实验运转,又提出了一个光纤光栅掺铒光纤双稳器件并分析了它的工作特点^[9],本文在此基础上分析这种高速低功率器件作为一种新型光开关和数字光信号放大器的工作原理、特性和参数,从而确定器件的设计原则。由于它仅用一小段光纤加以适当配置的光纤耦合器构成,因此有可能由它沿光纤一维集成,构成一种全新而简单的光纤通信全光信号再生器,以取代现行的光-电-光间接中继装置。

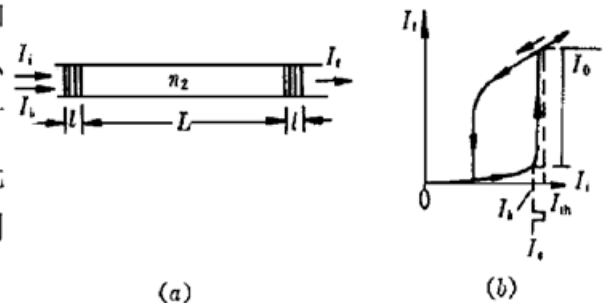


图 1 光纤光栅双稳光开关

Fig. 1 Fiber grating OBD switching

2 光纤光栅双稳光开关

文献[9]给出的光纤光栅双稳器件如图 1 (a) 所示,由一段纤芯折射率为 n_2 的掺铒光纤两

* 国家自然科学基金高技术探索项目资助。

端各写上一只光纤光栅构成,形同一只以光纤光栅为反射镜面的非线性 F-P 腔。利用光纤光栅反射率公式^[10]并考虑该段掺铒光纤的非线性相移,不难写出该器件的调制特性和反馈特性:

$$T_M(\varphi) \equiv I_t/I_i = T_0/\{1 + F \sin^2[(\varphi - \pi/2)/2]\} \tag{1}$$

$$T_F(\varphi) \equiv I_r/I_i = K(\varphi - \varphi_0) \tag{2}$$

式中 I_i 和 I_t 分别为器件入射和透射光强,但(2)式中的 I_r 是由非线性相移 φ 反解出来的; $\varphi = 2\pi nL/\lambda$ 为单程相移(n 为纤芯折射率, λ 为信号波长);

$$T_0 = (1 - \eta)^2 \exp(-2\alpha L)/(1 - R)^2 \tag{3}$$

$$F = 4R/(1 - R)^2 \tag{4}$$

分别为峰值透射率和 F-P 腔精度因子,这里 $\eta = \text{th}^2(\pi n_1 l/\lambda_0)$ (n_1 和 λ_0 为光纤光栅折射率调制幅和 Bragg 波长), α 为掺铒光纤振幅吸收系数;

$$K = \alpha\lambda(1 - \eta) \exp(-2\alpha L)/\{2n_1\pi(1 + R)I_i[1 - \exp(-2\alpha L)]\} \tag{5}$$

另用图解法求出直线簇(2) (其斜率 K 反比于输入光强 I_i) 与曲线(1) 的交、切点,可得系统运转的稳态解,它们构成图 1(b) 中的双稳回线,当输入光强由零增加时,系统将沿图 1(b) 示箭头演化,超过 b 点将上跳到高透射态,上跳光强为双稳阈值 I_{th} 。当随后减少入射光强时,系统将由高透射枝按图 1(b) 示箭头折回,形成图 1(b) 示光滞回线。当 φ 为某个临界值 φ_m 时,双稳回线的宽度为零,即退化为一微分增益曲线,这对应于曲线(1) 的最大斜率 $K_m = [dT_M(\varphi)/d\varphi]_{\varphi=\varphi_m}$,此时对应的阈值光强为最小阈值光强 I_{thm} 。

当光纤光栅双稳器件工作在双稳回线模式时,它可用作一个光开关,如图 1(b) 所示。只要选择一个略低于 I_{th} 的偏置光强 I_b ,将 OBD 偏置在低透射枝的 b 点,则当一个微小的信号脉冲到来时,系统便由低透射态跳至高透射态,于是,一个微小信号 I_s 就启动了一个大功率光开关 I_0 。利用区间嵌套法^[11] 计算了光纤光栅掺铒光纤双稳态开关的开关比 S 和开关功率 P_s ,分别如图 3(a) 虚线和点划线所示。由图可见,利用这种器件可实现信号功率为微瓦级的光开关。若需开关比较大,则光纤光栅的结构参数 $n_1 l$ (n_1 为光纤光栅折射率调制幅, l 为光栅长度) 要大,腔内光纤损耗较小。如前所述,不同初相点 φ 对应的双稳回线不同,图 3(b) 表示开关功率和对比度与 φ 的关系。由图可见,开关比 S 通常有一最佳 φ 值, P_s 则随 φ 增加而减小。

3 光纤光栅双稳态模拟光信号放大

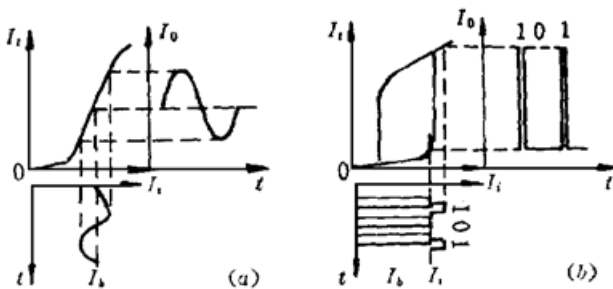


图 2 双稳态光信号放大

Fig. 2 Optical amplification by OBD

利用光学双稳态器件工作在微分增益模式,可构成模拟光信号放大,如图 2(a) 所示。放大器的偏置功率应选在微分增益曲线的直线部分。放大器的增益可以解析求解^[12]

$$G_A = A(I_s/I_b)^{-3/2} \tag{6}$$

其中 A 为模拟放大增益系数, I_s 和 I_b 分别为信号和偏置光强,而

$$A = T_0\{6FX(1 - X)/[1 + F(3 - 4X) + FX(X - 3)]\}^{1/3}/(1 + FX) \tag{7}$$

这里 T_0 为峰值透射率, F 为光腔精度系数, $X = \sin^2 \varphi_m / 2$, 其表达式为:

$$X = [(3F + 2) - \sqrt{(3F + 2)^2 - 8F}] / (4F) \tag{8}$$

对(4)式的计算表明, 典型的掺铒光纤光栅 OBD 的模拟光信号放大增益较低, 为 10~ 15 dB。(6)式所表明信号增益随信号幅度的减少而加大的规律为 Tooley 关于光双稳晶体管的实验^[13]和我们的实验^[14]所证实。

4 光纤光栅双稳态数字光信号放大

双稳态数字光信号放大原理如图 2 (b) 所示, 它比模拟放大有较高增益。利用双稳回线放大数字光信号不能用恒定光偏置, 而须用脉冲光偏置。这是因为当一个信号光脉冲到来而使 OBD 从低透射态跃迁到高透射态以后, 虽然脉冲不久就过去了, 但由于恒定偏置光的存在, OBD 自己不能返回低透射态为放大下一个脉冲做好准备。一个有效办法是采用脉冲光偏置。

脉冲偏置光信号放大的原理其实质是 OBD 的与门功能。偏置光脉冲 I_b 和信号光脉冲 I_s 同时到来时, OBD 跃迁到高透射态, 产生一个大的输出脉冲 I_o , 两脉冲都过去以后, OBD 回到低透射态, 为放大下一个信号脉冲做好准备。

这种脉冲偏置光信号放大有一个突出的优点, 就是只要选择信号光脉冲和时钟光脉冲有一个合理的相移, 那么, 就能在放大信号脉冲的同时压缩其脉宽, 如图 2 (b) 所示。这样也就能同时消除长途光纤传输因光纤损耗和色散所引起的信号衰减和波形展宽。

图 3(a) 实线是用区间嵌套法计算出来的光纤光栅掺铒光纤 OBD

的数字光信号放大增益 G_D , 图 2(b) 是 G_D 随初始相移的改变。由计算看到, 尽量低的偏置光脉冲幅度和尽量高的光增益恰好同时需要低的光栅参数 $n_1 l$, 即低的光纤光栅反射率, 而不是相反。这是由于相反情况下的光纤光栅掺铒光纤谐振腔精度太高, 因而具有较低的透射率。

5 一维集成数字光信号再生器件

我们计算了光纤光栅掺铒光纤 OBD 用作光开关和光信号放大器的工作参数。如文献[9]和本文所表明的, 一个这样的器件不过是由一段(短至数厘米的)掺铒光纤两端制作几毫米的光纤光栅构成, 可以在微瓦功率下高速运转。信号光和偏置光的同时引入可借助适度安排的光纤耦合器完成, 如果增益嫌小, 可以安排级联。这种数字光信号放大器, 实际上是数字光信号再

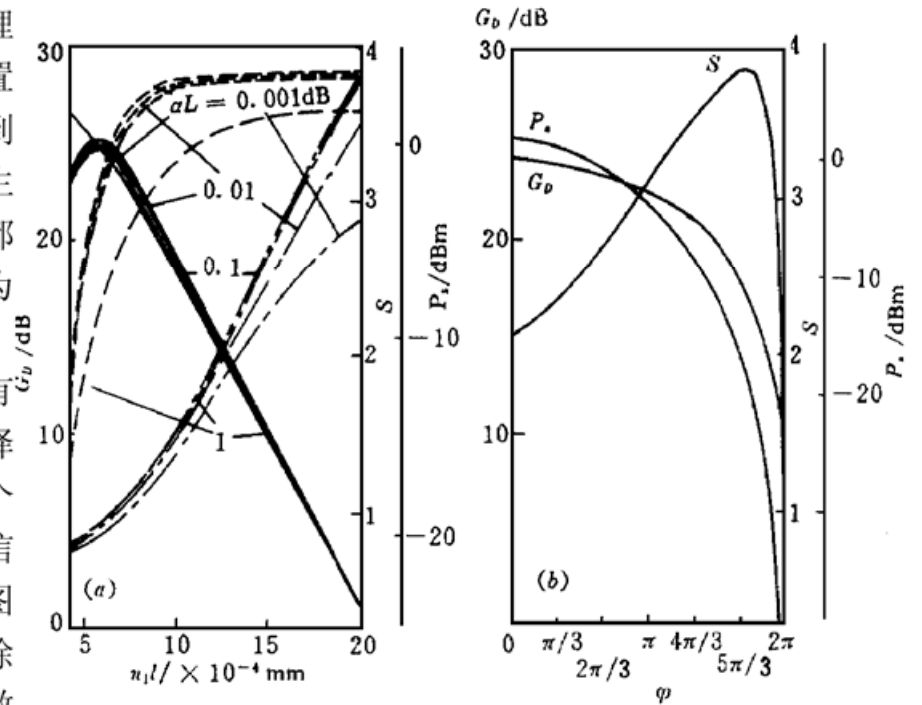


图 3 光栅双稳态开关和放大特性

Fig. 3 Characteristics of switching and amplification of grating OBD

生器,其功能可取代现行光纤通信线路上的光-电-光间接中继。由于是全光信号再生,信号处理速度和传输容量就会提高。但要做成实用器件,还有许多实际问题有待探讨和解决。

参 考 文 献

- 1 T. Venkatesan, P. J. Lemaire, B. W. Wilkens *et al.*. All-optical data switching in an optical fiber link using a GaAs OBD. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(7): 297
- 2 J. Capmany, M. A. Muriel, F. J. Frailed-Pelaez. Optical differential amplification in nonlinear fibre ring resonator. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(20): 1810~ 1812
- 3 Zhang Yuancheng, Song Qian, He Shaowei *et al.*. Optical signal amplification and processing using semiconductor laser diode OBD. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **A20**(7): 515~ 519 (in Chinese)
- 4 J. He, M. Cada, M. A. Dupertuis. All-optical bistable switching and signal regeneration in a semiconductor layered DFB/FP structure. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(7): 866~ 868
- 5 R. A. Betts, T. Tjugiarto, Y. L. Xue. Nonlinear refractive index in Erbium doped fiber: Theory and experiment. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(4): 908~ 913
- 6 Song Qian, Zhang Yuancheng, Li Jixing *et al.*. Optical bistability of an Er^{3+} -doped fiber under Ar^+ -laser irradiation. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(8): 719~ 721 (in Chinese)
- 7 Song Qian, Zhang Yuancheng, Li Jixing *et al.*. Er-doped fiber optical bistability by Ar-laser. *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.*, 1996, **1**(2): 203
- 8 Zhang Yuancheng, Song Qian. Optical switching by Er^{3+} -doped optical bistability. *Proceedings of Seventh National Conference on Optical Fiber Communication* (全国第七次光纤通信学术会议论文集) (Guilin, Guangxi), 1995. 685~ 687 (in Chinese)
- 9 Zhang Yuancheng, Zhang Ying. Optical bistability devices with fiber optical grating. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(9): 809~ 812 (in Chinese)
- 10 P. St. J. Russell, J. Archambault, L. Reekie. Fibre gratings. *Physics World*, 1993 (10): 41
- 11 Song Qian, Zhang Yuancheng. Calculation for OBD's steady-state parameters. *Quantum Electronics* (量子电子学), 1988, **5**(3): 234~ 240 (in Chinese)
- 12 Zhang Yuancheng, Song Qian. Digital optical signal amplification using an Er-doped fiber optical bistable device. *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.*, 1997, **2**(1): 45
- 13 F. A. P. Tooley, S. D. Smith, C. T. Seaton. High gain signal amplification in an InSb Traspasor at 77K. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(9): 807~ 809
- 14 Zhang Yuancheng, Song Qian. Optical pulse signal amplification with an optical bistable device. *Chinese Physics-Lasers*, 1988, **15**(6): 453

Optical Switching and Digital Optical Signal Amplification Using a Fiber Grating OBD

Zhang Ying

(The R & D Center of Telecom Technique, CATT, M. I. T., Beijing 100083)

Abstract It is proposed that an Er-doped fiber bistability device with fiber gratings may be used as an all-optical switch or a digital signal amplifier of low power and high speed. And, the device is one-dimensionally integratable along the fiber. The operation, characteristics, and parameters of these devices are analysed and calculated to give a design principle.

Key words optical fiber grating, optical bistability device, optical signal amplification