

非线性光纤环: 3. 掺铒光纤双稳态数字光信号放大器*

张远程

宋 蹇

(武汉大学物理系, 武汉 430072) (武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

摘 要 讨论了各种掺铒光纤双稳全光信号放大器的原理和特性, 计算了它们在恒定光偏置和脉冲光偏置下的光增益及其随器件参数的变化, 给出了器件的设计原则。

关键词 光学双稳性, 全光信号放大, 数字光信号处理, 掺铒光纤。

1 引 言

光学双稳器件(OBD)的一个重要应用是用作光信号放大器^[1]。虽然半导体行波放大器, 光纤放大器和光纤拉曼放大器也可以放大光信号, 但是, 由于它们本质上都是模拟光信号放大器, 只能单纯进行光信号幅度的放大, 而不能克服传输中的波形畸变。光学双稳器件中只有对应于逻辑“0”的低输出态和对应于逻辑“1”的高输出态这两个稳态, 因而光学双稳态光信号放大器本质上是一种数字光信号放大器。它可以在放大光信号幅度的同时, 进行光脉冲的脉宽压缩和波形整形, 因而极适合于数字光纤通信系统^[2]。利用光纤作为非线性介质和制作光腔反射镜的全纤光双稳放大器, 不仅可构成一种全光纤器件, 且有希望与光纤激光器一起制作在一根光纤上, 完成光信号的产生和放大(一维光集成); 而且, 若采用掺铒光纤, 由于它具有比普通光纤高 4 个数量级的非线性折射率系数(Kerr 系数 n_2)^[3], 所以运转功率十分低^[4]; 加之, 光纤通信第三低损耗窗口 $1.55 \mu\text{m}$ 波长正是 Er^{3+} 离子的强吸收峰, 共振增强非线性完全能使双稳阈值降至光纤通信线路上的功率水平, 且光纤基质响应时间达飞秒量级^[5], 这就为这种一维光集成器件在未来的全光数字通信中, 完成光-光直接中继, 为数字光纤网的高速率、高容量化做出巨大贡献。本文作者已完成几种光学双稳态光信号放大的实验工作^[2, 6, 7], 已实现近 200 倍的光信号增益和 25 倍的脉宽压缩。本文在这些实验工作和有关全纤光学双稳态理论与实验工作^[4, 8]的基础上, 讨论掺铒光纤光学双稳态的数字光信号放大。

2 纤环双稳态的光信号放大

文献[4]中分析了 4 种掺铒纤环双稳器件(FROBD)。它们都具有如下的调制特性和反馈

* 国家自然科学基金高技术探索项目资助。

收稿日期: 1996 年 6 月 6 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 23 日

特性:

$$T_M(\varphi) = T_0 / (1 + F \sin^2 \varphi/2) \quad (1)$$

$$T_F(\varphi) = K(\varphi - \varphi_0) \quad (2)$$

在非线形运转条件下, 它们都能产生图 1(a) 所示的光学双稳回线, 只是(1)、(2)式中的 T_0 、 F 、 K 之表达式和双稳回线具体形态及双稳阈值功率 P_{th} 不同。对于一个确定结构和参数的纤环双稳器件, 不同初相 φ_0 下的双稳回线随 φ_0 的增大而变窄, 当 φ_0 减至某个临界值 φ_{0m} 时, 双稳曲线的宽度减至零, 回线退化为一条微分增益曲线, 如图 1(b) 所示, 这时双稳阈值功率也降至最小值 P_{thm} 。再小的光强就不能产生双稳现象。

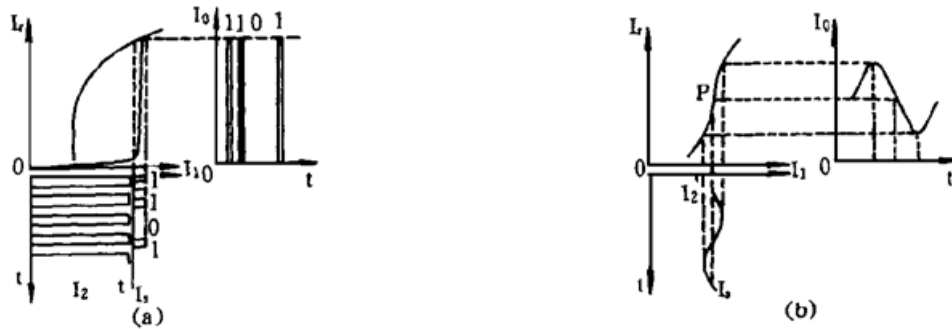


Fig. 1 Optical signal amplification of FROBD

2.1 模拟光信号放大

在图 1(b) 的微分增益曲线上选一工作点 P , 该点曲线的斜率确定了一个微分增益

$$G_A = dI_0/dI_1 \quad (3)$$

因而, 当一个模拟光信号 I_s 与一偏置光信号 I_b 同时加在纤环双稳器件的输入端时, 会有一放大的光信号 I_0 输出, 如图所示。由于 I_b 是一恒定偏置光, 故将这种工作方式称为恒定光偏置 (CLB) 光信号放大。放大信号的能源显然来自 I_b , 正如一只晶体管依靠电源提供的能量放大信号一样。下节的分析表明, 恒定光偏置放大只有较小的光增益。文献[7]所报道了利用氩氖激光-铈酸锂混合型光学双稳装置, 在不同工作条件下实现约 1.3~15 倍的固定光偏置光信号增益。与之相比, 该装置实现的脉冲光偏置光信号增益 20~95 则要大得多。

2.2 数字光信号放大

微分增益曲线当然也可以用来放大数字光信号, 但如想得到较大增益应采用双稳回线, 不过此时不能采用恒定偏置, 因为信号光脉冲过去以后, 纤环双稳器件系统不能自行回到低态以便放大下一个光脉冲。一个有效的方法是采用脉冲光偏置 (PLB), 如图 1(a) 所示。在前期实验工作^[2, 7]中还采用了使偏置光脉冲与信号光脉冲有一固定相移的作法, 这样可在放大光脉冲的同时, 实现脉宽压缩。这显然是由于光学双稳器件的与门功能。而且, 由于光学双稳器件具有良好的限幅作用, 所以输出光脉冲可被整形为良好的矩形。文献[2]利用半导体激光双稳态完成了脉冲光偏置光信号放大的模拟实验。实现了最大约 22.5 dB 的光信号增益, 并通过使信号光脉冲相对偏置光脉冲发生相移, 获得了伴随脉宽压缩约 5 倍。最大压缩比达 25 倍。文中图 3(f) 还明确显示了将一个三角波输入光脉冲变成良好矩形输出光脉冲的整形效应。

脉冲光偏置光信号放大可望在数字光纤通信网中获得广泛应用。由于上述特征, 它可以同时完成两项功能, 即以信号放大补偿长途光纤传输的损耗; 以脉宽压缩和整形补偿长途光纤传输因色散而造成的波形畸变。用纤环双稳器件完成的是全光信号放大, 本质上不同于传

统的光-电-光间接中继, 它避免了将光信号转变成电信号处理这一中间环节, 从而可大大提高光纤通信线路上的传输速度和信息容量。

定义脉冲光偏置光信号放大的增益为[图 1(a)]

$$G_D = (I_C - I_D) / \Delta I_I \quad (4)$$

3 纤环双稳器件放大光信号增益

4 种纤环双稳器件的光信号放大可统一分析, 随后再将文献[4]中有关结果代入计算。

3.1 模拟光信号放大增益(恒定光偏置方式)

将调制特性在其拐点 φ_m 附近作泰勒展开, 取至 $\Delta\varphi^3$ 项:

$$T_M(\varphi) = T_M(\varphi_m) + T'_M(\varphi_m) \Delta\varphi + \frac{1}{6} T'''_M(\varphi_m) \Delta\varphi^3 \quad (5)$$

由于 $T''_M(\varphi_m) = 0$, $\Delta\varphi^3$ 项消失。利用文献[4]中关于反馈特性斜率反比于输入光强的结果, 可得

$$\Delta K = - \frac{K_m}{I_{lm}} \Delta I_i \quad (6)$$

式中 $K_m = T'_M(\varphi_m)$ 为调制特性最大斜率, $I_{lm} = I_{thm}$ 为该斜率对应的最小双稳阈值光强, ΔI_i 为斜率 $K_m + \Delta K$ 对应的输入光强增量, 由式(5)、(6)及图 2(a) 不难得到

$$G_A = A \left[\frac{I_{lm}}{\Delta I_i} \right]^{3/2} \quad (7)$$

式中 A 为增益系数

$$A = K_m \sqrt[3]{6T_m/T_{m3}} \quad (8)$$

其中

$$T_{m3} = T'''_M(\varphi_m)$$

由(7)式可得到图 2(b) 的恒定光偏置放大增益特性, 它随信号光强幅度 ΔI_i 的增大而减小, 这与 Tooley 关于 InSb 光双稳晶体管的增益特性的实验结果^[11]是一致的。与文献[7]的实验结果也是一致的。对于(1)式的调制特性, 由于

$$T_m = T_0 / (1 + FX) \quad (9)$$

$$K_m = T_0 F \sqrt{X(1-X)} / (1 + FX)^2 \quad (10)$$

$$T_{m3} = T_0 F \sqrt{X(1-X)} [1 + F(3 - 4X) + F^2 X(X - 3)] / (1 + FX)^4 \quad (11)$$

式中

$$X = \sin^2 \varphi_m / 2 \quad (12)$$

可有增益系数 A 的解析形式

$$A = T_0 \{ 6F^2 X(1-X) / [1 + F(3 - 4X) + FX(X - 3)] \}^{1/3} / (1 + FX) \quad (13)$$

3.2 数字光信号放大增益(脉冲光偏置方式)

数字光信号放大增益[(4)式]需对特定器件、特定参数、在某特定初相 φ 下求解联立方程(1)、(2), 得到双稳跳变点(D、C)的输出光强算出, 没有解析解。作者利用区间嵌套法^[9], 在 IBM-PC 机上求解, 得到在腔长 1 m、初相 $\varphi = 0$ 时不同器件结构、不同参数下的数字光信

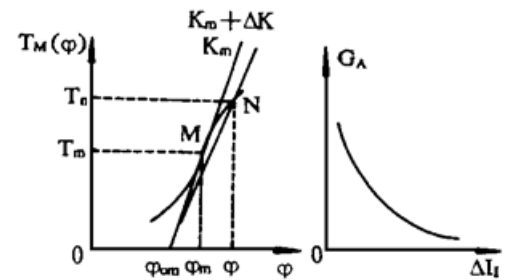


Fig. 2 Optical gain for CLB amplification

号增益 G_D , 如图 3 中实线所示。计算中对于不同的纤环双稳器件器件结构, 有关参数利用了文献[4]中的有关各式。图中虚线是相应器件的模拟光信号放大增益。

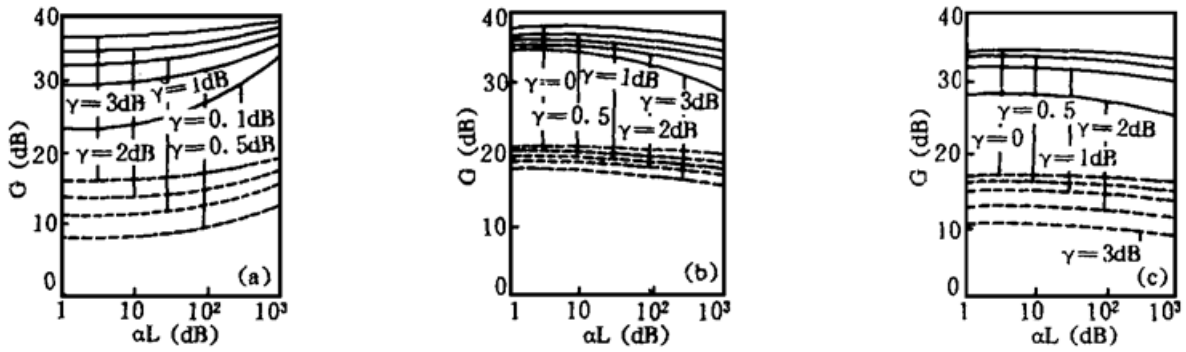


Fig. 3 Optical gain for FROBD amplification

(a) DFRR devices, (b) TFRR devices, $k = 0.8$, (c) FMR devices, $k = 0.1$

由此可见恒定光偏置光信号放大增益一般都小于相应的脉冲光偏置光信号增益。在计算直耦纤环谐振腔(DFRR)和互耦纤环谐振腔(CFRR)结构的纤环双稳器件时, 如文献[4]所分析的, 其输出双稳特性尚需由该文献中(36)式换算, 故需将该式微分, 即

$$dI_3 = (1 - \gamma)dI_1 - (1 - R)dI_4, \quad (\text{DFRR}) \quad (14)$$

由此式得出这两种结构的纤环双稳器件光放大增益(互耦纤环谐振腔需将下标 3、4 互换)。

双耦纤环谐振腔和纤镜光纤谐振腔结构器件的光信号增益与相应的光纤耦合器的耦合系数 k 有关, 如图 4 所示。



Fig. 4 Optical signal gain for different coupling coefficients

(a) TFRR devices, $\alpha = 10 \text{ dB/km}$, (b) FMR devices, $\alpha = 10 \text{ dB/km}$

结 论 计算了各种结构的纤环双稳器件用作模拟和数字光信号放大的光信号增益, 计算中将 $1 \mu\text{W}$ 作为信号光大小, 同时, 选用文献[3]中掺铒光纤的非线性折射系数 n_2 值, 所得到的各种光增益直接以分贝(dB)表示。这些器件大体上能得到 10~ 20 dB 或更大的光增益。由这些结果可以看出, 光纤耦合器的损耗(参数 γ) 光纤损耗(参数 α) 较大都会导致增益显著下降。直耦纤环谐振腔和互耦纤环谐振腔结构因它们是信号反相输出, 情况正相反, 所以损耗大时应采用这两种结构的器件。但是由于其输出跳变对比度小, 因而会有很大的本底, 从而形成较大噪声。利用双耦纤环谐振腔和纤镜光纤谐振腔两种器件结构, 则需 $\gamma < 1 \text{ dB}$, $\alpha < 1000 \text{ dB/km}$, 才有较大光增益。如需更大增益, 可将上述器件多级级联, 并沿光纤集成获得所需增益。

参 考 文 献

- [1] F. A. P. Tooly, S. D. Smith, C. T. Seaton, High gain signal amplification in an InSb irasphaser at 77 K. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(9) : 807~ 809
- [2] 张远程, 宋 骞, 何绍伟等, 半导体激光双稳态光信号放大和处理. 中国激光, 1993, **A20**(7) : 515~ 519
- [3] R. A. Betts, T. Tjgiarto, Y. L. Xue *et al.*, Nonlinear refractive index in Erbium doped optical fiber: theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(4) : 908~ 913
- [4] 张远程, 宋 骞, 非线性光纤环: 1. 光纤双稳态. 光学学报, 1997, **17**(6) : 702~ 709
- [5] S. R. Friberge, Y. Silberberg, M. K. Oliver *et al.*, Ultrafast all-optical switching in a dual-core fiber nonlinear coupler. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(15) : 1135~ 1137
- [6] 张远程, 宋 骞, 光双稳器件光信号放大的处理, 戚作钧教授执教 50 周年学术研讨会论文集, 合肥, 中国科技大学出版社, 1990 : 6~ 12
- [7] 张远程, 宋 骞, 混合型光学双稳态的光脉冲放大. 中国激光, 1988, **15**(6) : 359~ 362
- [8] 宋 骞, 张远程, 非线性光纤环: 2. 掺铒光纤全纤光学双稳态实验. 光学学报, 1997, **17**(7) : 855~ 858
- [9] 宋 骞, 张远程, 光学双稳器件定态参数的计算. 量子电子学, 1988, **5**(3) : 234~ 240

Nonlinear Fiber Loop: 3. Digital Optical Signal Amplification with Er-Doped-Fiber Optical Bistable Devices

Zhang Yuancheng

(*Physics Department, Wuhan University, Wuhan 430072*)

Song Qian

(*Electronics & Information Institute, Wahan University, Wuhan 430072*)

(Received 6 June 1996; revised 23 October 1996)

Abstracts Principle and characteristics for all-optical signal amplification with Er-doped fiber optical bistable devices are discussed. The optical gain under constant-light-bais and pulse-light-bais and its variance with device's parameters are calculated. The design principles of the devices are given.

Key words optical bistability, all-optical signal amplification, digital optical signal processing, Er-doped optical fiber.