

氩离子激光掺铒光纤的双稳态*

宋 蓐 张远程 李吉星 张援农

(武汉大学, 武汉 430072)

提要 分析了掺铒光纤双稳态(EDFOB)的工作原理、工作条件和特性,并利用氩离子激光(514.5 nm)实现了EDFOB的低功率(<10 mW)运转。实验与理论结果基本相符。

关键词 光双稳性,掺铒光纤,全光器件

1 引言

光双稳器件(OBD)是一种有广泛应用灵活性的器件,它可以用作光开关、放大、整形、逻辑和计算等各种光信号处理^[1]。利用光纤本身作为非线性介质做成光纤双稳器件(FOBD),不仅能制成一种全光纤器件,而且,由于它纵向尺寸大、横向尺寸小,所需阈值功率相当低;同时,作为光纤基质的石英玻璃的响应时间又极短(fs级)^[2],因而传输速率极高。

光纤双稳态(FOB)的首次运转在1983年^[3]。但实验用的是普通光纤,其阈值功率高至100 W级。掺铒光纤在氩离子激光器514.5 nm 激光波长下,具有比普通光纤高4个量级的克尔非线性系数^[4];且光纤第三通信窗口1.55 μm正是Er³⁺离子的强吸收峰,因而有更大的共振增强非线性,这样FOB阈值能达到光纤通信功率水平。

本文讨论了掺铒光纤双稳态(EDFOB)的原理、特性和工作条件,报道了EDFOB的运转。

2 原理

实现光纤双稳运转,应该采用由光纤耦合器和非线性光纤构成的分布式行波或驻波光纤谐振腔(OFR)。这种适合于光纤通信的器件形式我们已有另文讨论。本工作利用由光纤和部分反射镜构成的驻波光纤谐振腔,如图1所示。设掺铒光纤长为 L ,光腔总长为 $L+l$, M_1, M_2 的透射率和反射率分别为 T 和 $R=1-T$ 。则光腔调制特性为

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

式中 I_i 和 I_T 分别为入射和透射光强, φ 为单程相移,

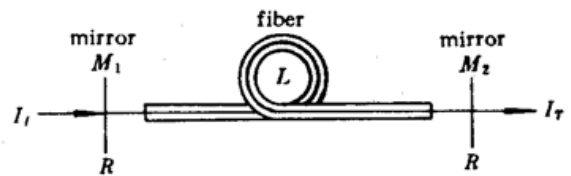


Fig. 1 Optical fiber resonator

* 国家自然科学基金(高技术探索课题)资助项目。

收稿日期: 1995年9月11日; 收到修改稿日期: 1995年11月24日

$$T_0 = T^2 \exp(-\alpha L) / [1 - R \exp(-\alpha L)]^2 \quad (2)$$

$$F = 4R \exp(-\alpha L) / [1 - R \exp(-\alpha L)]^2 \quad (3)$$

α 为光纤光强吸收系数。

考虑到光纤内的非线性相移, 可得反馈特性

$$T_r(\varphi) = I_r/I_t = K(\varphi - \varphi_0) \quad (4)$$

式中 φ_0 为初始相移,

$$K = \lambda \alpha (1 - R) / \{2\pi [1 + R \exp(-\alpha L)] n_2 [\exp(\alpha L) - 1] I_t\}, \quad \varphi_0 = 2\pi(n_0 L + l) / \lambda \quad (5)$$

λ 为光波在真空中的波长, n_0 和 n_2 分别为弱光折射率和非线性折射率系数。

系统可能存在的状态对应于(1), (4)式曲线的交点, 光双稳最小阈值光强 I_{thim} 对应于调制特性的最大斜率 K_m ^[5]。不难得知

$$K_m = 2T_0 F \sqrt{X_m(1 - X_m)} / (1 + F X_m)^2 \quad (6)$$

$$X_m = [3F + 2 - \sqrt{(3F + 2)^2 - 8F}] / 4F \quad (7)$$

$$I_{\text{thim}} = \lambda \alpha (1 - R) / \{2\pi n_2 [1 + R \exp(-\alpha L)] K_m [\exp(2\alpha L) - 1]\} \quad (8)$$

3 实 验

实验装置如图 2 所示。图中, 除图 1 所示驻波式光纤谐振腔外, 光源采用氩离子激光器 514.4 nm 激射。适当设计掺铒光纤长度, 使其不过长而造成太多衰减, 不过短而达不到双稳运

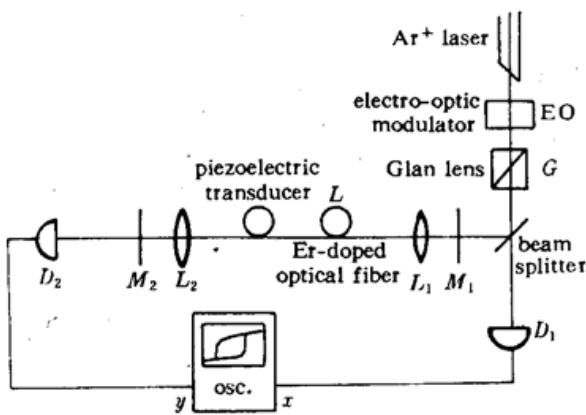


Fig. 2 Experimental setup

转的非线性相移量。激光器谐振腔内已设置了一个法布里-珀洛标准具, 所以, 光纤谐振腔用的是单模光源, 因此本实验装置可保证米级光纤长度远小于该单模激光的相干长度。而这正是光纤谐振腔具有(1)式所示调制特性的一个必要的基本条件。如此选出的单纵模相干光为 CW 光, 利用图中的铌酸锂电光调制器 EO 加以调制后, 实现了输入光的光强扫描。图中为实现光束与光纤的最佳耦合, 腔内用了会聚透镜, 其参数应精心设计, 并用五维光纤精密微调架精心调节。G 为格兰棱镜。

为了实验上的目的, 光纤谐振腔内增设了压电传感器 PT, 它所用的光纤是腔内掺铒光纤总长的一部分, 由腔内光纤在一圆柱形压电材料上紧绕若干圈构成, 圆柱压电棒的两个端面上镀有金属电极, 其上施加可调直流电压, 用以改变(微调)光腔总长, 使初始相移可以随之调整。这种变化造成的纤长增量仅需为光源波长的数量级, 所以是容易实现的。分束片 B 除保证适当的输入光强外, 还将输入光强之一部分与 M_2 提供的输出光强, 经光电探测器 D_1 和 D_2 检测成与它们成正比的光电流, 分别送入示波器 OSC. 的 x, y 输入端, 观察双稳回线, 此回线宽度随初相移(通过调整压电传感器的控制电压)而变。在与最低双稳阈值相应的初相移时, 滞回宽度减至零而成为一条微分增益曲线。图 3 是其中两条双稳回线的示波照片, 其双稳阈值分别为 7.5 mW 和 9.1 mW。它们分别对应于两个不同的初始相移 φ_0 , 或两个不同的压电传感器控制电压。

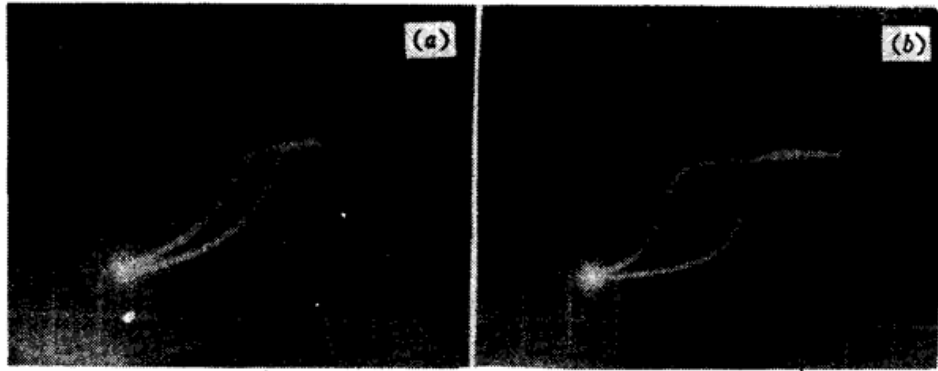


Fig. 3 Experimental photographs showing optical bistability

实验中使用的是电子工业部 46 所提供的低浓度掺铒光纤,腔内光纤总长 1.63 m。由 $n_2 = (6.9 \pm 1.5) \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ 的实验值^[4],按非线性折射率引起介质内的光程差约为一个光波波长的光双稳条件粗略估计 ($8n_2P_{\text{th}}L/\pi d^2 \sim \lambda$, $d = 6.25 \mu\text{m}$ 为纤芯直径)得双稳阈值光功率 $P_{\text{th}} \sim 0.7 \text{ mW}$ 。在实验条件下,用剪断法实测该光纤 514.5 nm 处的损耗系数 $\alpha = 0.1795 \text{ m}^{-1}$,由此及上述 n_2 值,按式(8)估算,并换成光功率,得 $P_{\text{thim}} = 3.7 \text{ mW}$,这里已将图 2 中耦合透镜的耦合效率(按 50% 的实验值计)这一因素考虑进去。它们对光腔的影响,是相应地降低了有效镜面反射率 R 和光腔最大透过率 T_0 。注意 P_{thim} 是特定光腔双稳阈值对不同初相 φ_0 而言的最小值(其时双稳回线变成一条微分增益曲线,即回线宽度为零),所以实验与理论基本符合。

综上所述,我们在已有的光双稳实验工作的基础上^[5,6],实现了掺铒光纤双稳态运转。运转还是低功率的(低于 10 mW)。实验与理论是相符的。观察到的双稳上升时间远小于 $1 \mu\text{s}$ 。

参 考 文 献

- 1 N. Peyghambarian, H. M. Gibbs. Optical nonlinear, bistability, and signal processing in semiconductors. *J. Opt. Soc. Am.*, 1985, B2(7): 1212~1227
- 2 S. R. Friberg, Y. Silberg, M. K. Oliver. Ultrafast all-optical switching in a dual-core fiber nonlinear coupler. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(15): 1135~1137
- 3 H. Nakutsuka, T. Tjugiarto, Y. L. Xue. Observation of bifurcation to chaos in an optical bistability system. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 50(2): 109~112
- 4 R. A. Betts, S. Asaka, H. Itoh. Nonlinear refractive index in Erbium doped optical fiber; theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1991, QE-27(4): 908~913
- 5 张远程, 宋 骞. 半导体激光双稳态光信号放大的处理. *中国激光*, 1993, 20(7): 515~519
- 6 张远程, 宋 骞. 半导体光双稳中继放大器. 全国光放大器与全光通信学术交流讨论会, 全国光光子通信技术讨论会论文集, 北京, 1991. 123~125

Optical Bistability of an Er^{3+} -doped Fiber under Ar^+ -laser Irradiation

Song Qian Zhang Yuancheng Li Jixing Zhang Yuannong

(Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract Principle, characteristics and operation of Er-doped fiber optical bistability (EDFOB) are analyzed. Low power ($<10 \text{ mW}$) operation of EDFOB is realized using an Ar^+ -laser (514.5 nm). The experimental result is consistent with theory.

Key words optical bistability, Er-doped fiber, all-optical device