

非线性光纤环: 2. 掺铒光纤全纤光学双稳态实验*

宋 骞 张远程**
(武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

摘 要 利用掺铒光纤和光纤定向耦合器组成全光纤谐振腔, 在光学非线性条件下, 实现了全纤光学双稳运转, 实验双稳阈值与理论相符。

关键词 光学非线性, 光学双稳态, 掺铒光纤。

1 引 言

光学双稳器件(OBD)因其可用作全光开关, 放大和整形^[1~3], 因而有可能在未来的全光通信中发挥重要作用。人们用过气体, 液体, 半导体多量子阱等材料作为光学双稳器件的介质。光导纤维由于横向尺寸小(μm 数量级), 纵向尺寸大(m 级), 因而在一定光功率下, 光强度高, 非线性相移大, 所以, 它是光学双稳器件的一种十分具有吸引力的材料。人们将来有可能将激光器, 光学双稳态调制器, 放大器, 制作在一根光纤上(“一维光集成”), 集光信号的产生, 调制、放大于一体。但是, 普通石英光纤的非线性折射率系数(克尔系数 n_2) 较半导体材料小, 因而首例光纤双稳实验^[4]的光双稳阈值高达几十至几百瓦, 大大超过了光纤通信的功率水平。

掺铒光纤具有比普通光纤大 4 个数量级以上的克尔系数^[5]。作者在已有光双稳实验工作^[3, 6, 7]的基础上, 提出以掺铒光纤和光纤耦合器制作掺铒光纤双稳器件(EDFOBD), 本文报导就是一个这样的实验。

2 实验原理

全纤掺铒光纤双稳器件有多种结构, 全面的理论分析另文给出^[8]。本文采用的是纤镜谐振腔(FMR)结构, 现对其工作原理简加叙述。

图 1(a) 是纤镜谐振腔结构的掺铒光纤双稳器件, 其中 FM_1, FM_2 是两只光纤环反射镜, 它们各由一只光纤定向耦合器和一小段长为 l_i 的光纤组成。光纤耦合器耦合系数为 k_i , 损耗

* 国家自然科学基金高技术探索项目资助。

** 武汉大学物理系。

收稿日期: 1996 年 6 月 6 日; 收到修改稿日期: 1996 年 9 月 9 日

为 $\gamma_i (i = 1, 2)$, FM_1 具有光强反射系数 R_i , 透射率 T_i ^[9]

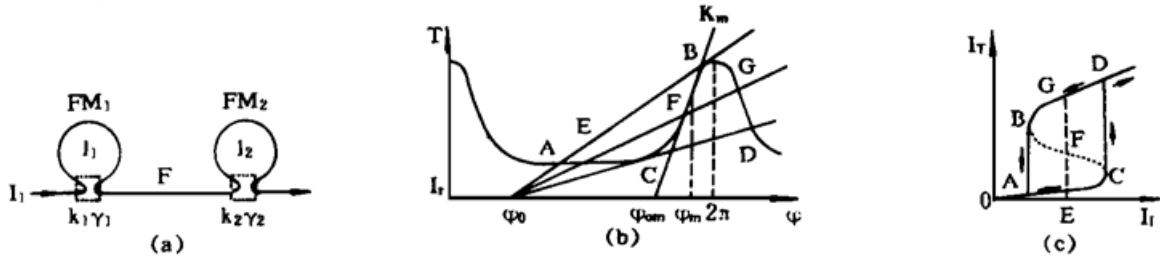


Fig. 1 Fiber mirror resonator OBD

$$R_i = 4k_i(1 - k_i)(1 - \gamma_i)^2 \exp(-2\alpha l_i), \quad (i = 1, 2) \tag{1}$$

$$T_i = (1 - 2k_i)^2(1 - \gamma_i)^2 \exp(-2\alpha l_i), \quad (i = 1, 2) \tag{2}$$

式中 α 是那段光纤的振幅吸收系数, 可见, 当 $k = 0.5$ 时 FM 有最大反射率和最小透射率。注意 $A_i = R_i + T_i = (1 - \gamma_i)^2 \exp(-2\alpha l) < 1$, 这与普通光学镜片不同, $1 - A_i$ 是光纤环反射镜的总损耗率。

与两只普通光学镜片夹一块光学介质可构成一个光学谐振腔(法布里-珀罗腔)一样, 两只 FM 与图 1(a) 中的一段长为 L 的光纤 F 也构成一个全光纤谐振腔, 二者都是驻波谐振腔, 腔内有正、反两向行波运行。借助法布里-珀罗腔的调制特性, 将镜片的反射率和透射率换成这里的 R_i 和 T_i , 照样得到纤镜谐振腔的调制特性, 与文献[8]中用严格的传输矩阵所得相同

$$T_{M(\varphi)} \equiv I_T/I_I = T_0 / \{1 + F \sin^2[(\varphi - \pi)/2]\}, \quad \varphi = 2\beta L \tag{3}$$

最大透射率 T_0 , 光腔精度因子 F 和等效反射率 R 分别为

$$\begin{aligned} T_0 &= T_1 T_2 \exp(-2\alpha L) / (1 - R)^2, & F &= 4R / (1 - R)^2, \\ R &= (R_1 R_2)^{1/2} \exp(-2\alpha L) \end{aligned} \tag{4}$$

其中 R_i, T_i 如(1)、(2)式所示。

沿光纤 L 的光轴建立 z 坐标, 如图 1(a), 令腔内正、反两行波光强分别为 $I_{cf}(z)$ 和 $I_{cb}(z)$, 则显然有

$$I_{cf}(L) = I_T / T_2, \quad I_{cb}(L) = I_{cf}(L) R_2 \tag{5}$$

由此可求出腔内光强沿 z 轴的变化

$$I_{cf}(z) = I_T \exp[2\alpha(L + l_2 - z)] / [(1 - 2k_2)^2(1 - \gamma_2)^2] \tag{6}$$

$$I_{cb}(z) = 4I_T(1 - k_2)k_2 \exp[-2\alpha(L - z)] / (1 - 2k_2)^2 \tag{7}$$

在非线形条件下, 即腔内光强造成显著的非线形相移的条件下, 一段长 dz 的光纤产生的非线形相移为

$$d\varphi_L = (2\pi/\lambda) n_2 I_c(z) dz \tag{8}$$

这里 n_2 为纤芯克尔系数, λ 为光波波长, $I_c(z) = I_{cf}(z) + I_{cb}(z)$ 为腔内总光强。将(8)式从 $z = 0$ 到 $z = L$ 积分有

$$\begin{aligned} \varphi_{RL} \equiv \varphi - \varphi_0 &= 2(2\pi n_2/\lambda) \int_0^L [I_{cf}(z) + I_{cb}(z)] dz \\ &= \pi n_2 I_T [\exp(2\alpha L) - 1] (1 + R_2) / (\alpha \lambda T_2) \end{aligned} \tag{9}$$

以上计算忽略了 FM 中那两小段光纤的非线形相移和损耗。式中的

$$\varphi_0 = (\lambda/2\pi) n_0 L \tag{10}$$

为低光强相移(初始相移), n_0 为纤芯弱光折射率。由(9)式反解出 I_T , 并除以 I_I , 得一反馈特性

$$T_F(f) \equiv I_T/I_I = K(\varphi - \varphi_0) \quad (11)$$

这是一条以初相点 φ_0 为起点, 以 K 为斜率的直线(图 1(b)), 斜率 K 反比于输入光强 I_I

$$K = \lambda \alpha T_2 \exp(-2\alpha L) / \{2\pi n_2 [1 - \exp(-2\alpha L)] (1 + R_2) I_I\} \quad (12)$$

图 1(b) 中绘出了三个不同输入光强所对应的三条反馈特性, 它们与调制特性 $T_M(\varphi)$ 交点是光纤双稳器件可能存在的状态, 各状态点一一对应于图 1(c) 中。由此不难理解图 1(c) 中双稳回线的形成。

3 实验装置及实验结果

图 2 是纤镜谐振腔结构的掺铒光纤双稳器件实验装置。实验中所用掺铒光纤 F 是电子工业部天津 46 所提供的低浓度掺铒光纤。光纤耦合器为武汉邮电科学研究院协助制作。图中 PT 是压电传感器, 其作用是改变(10)式和图 1(b)中之初始相移 φ_0 , 以得到不同宽度的双稳回线。它由一圆柱形压电材料构成, 圆柱两端面镀有金属电极, 在一可调直流电压作用下, 因压电效应而伸缩。这样, 若将腔内掺铒光纤在其柱面上绕若干圈, 则其可变直流电压将改变(微调)腔内光纤之长度 L , 从而达到改变 φ_0 的目的。显然, L 的改变量只须为波长 λ 的数量级, φ_0 即可在 0 到 2π 间任意改变。

图中 S 为本实验光源——氩离子激光器, 实验用其 514.5 nm 激光射线。这一光源是连续波输出的。为了得到双稳回线, 输入光强必须从 0 变到双稳阈值光强以上。为此, 利用图中电光调制器 EO 和格兰棱镜 G 来实现光强调制。所产生的光强周期调制的光束经分束镜 BS 分成强弱不等的两束, 主束经耦合透镜 L 耦合进掺铒光纤双稳器件腔的输入端纤镜 FM_2 ; 另一弱束送到一个光电探测器 D_1 产生一个与掺铒光纤双稳器件输入光强 I_I 成比例的电信号送到双踪示波器(KIKUSUI COS 5021 型) OSC 的 X 轴输入端, 代表输入光强的扫描信号。为了使更多的光功率送进掺铒光纤双稳器件, FM_2 的输入光纤需置于一台五维精密光纤微调架上, 并与耦合透镜 L 的支架置于防振光学平台上, 精心调整此精密光纤微调架, 可使工作达最佳状态。经 FM_1 的输出光纤输出的掺铒光纤双稳器件信号, 由第二只光电检测器 D_2 检测相应电信号, 送 OSC 的 Y 轴输入端, D_1, D_2 均采用武汉大学物理系半导体厂 2CU79 型光电二极管配以相应电路。调节 PT 的直流控制电压, 可得不同宽度的双稳回线, 图 3 是其中两条的示波照片, 其双稳阈值分别为 8.5 mW, 9.7 mW。

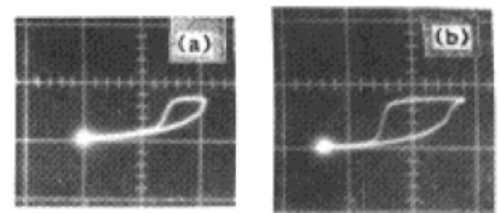
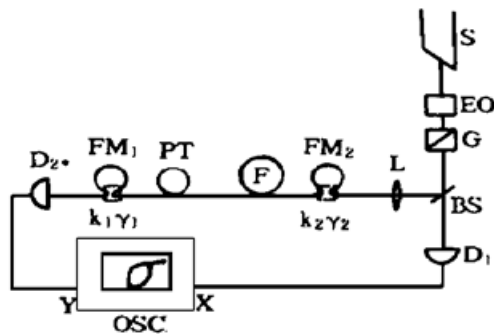


Fig. 3 Experimental oscilloscope photographs

Fig. 2 Experimental setup

FM_{1, 2}: fiber loop mirrors, f: Er-doped fiber, PT: piezo-electric transducer, L: lens, BS: beam splitter, G: glan lens, EO: electro-optical modulator, s: Ar-laser, D_{1, 2}: photoelectric diodes, OSC: oscilloscope

从图 1 得知, 产生双稳现象的必要条件是非线性相移量需达 2π 数量级, 从此导出阈值功率为 $P_{th} = \pi\lambda d^2 / (4n_2L)$, 以文献[5]中之 n_2 代入, 算得 $P \approx 2.1 \text{ mW}$, 表明实验与理论值基本相符 (实验中 $d = 6 \mu\text{m}$, $L = 1.05 \text{ m}$)。误差可能源于光纤掺铒浓度不同和工作波长不同导致 n_2 值的差异。

参 考 文 献

- [1] T. Venkatesan, P. J. Lemaire, B. Wilkens *et al.*, All-optical data switching in an optical-fiber link using a GaAs OBD. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(7) : 297~ 299
- [2] F. A. P. Tooley, S. D. Smith, C. T. Seaton, High gain signal amplification in InSb transphaser at 77K. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(90) : 807~ 809
- [3] 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
- [4] H. Nakatsuka, A. Asaka, H. Itch *et al.*, Observation of bifurcation to chaos in an all-optical bistable system. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, **50**(2) : 109~ 112
- [5] R. A. Betts, T. Tjugiarto, Y. L. Xue *et al.*, Nonlinear refractive index in Erbium doped fiber: theory and experiment. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1991, **QE-27**(4) : 908~ 913
- [6] Zhang Yuancheng, Song Qian, Optical Pulse signal amplification with an optical bistable device. *Chin Phys. Lasers*, 1988, **15**(6) : 453~ 456
- [7] 张远程, 宋 骞, 光双稳器件光信号放大和处理. 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
- [8] 张远程, 宋 骞, 非线性光纤环: 1. 光纤双稳态. 光学学报, 1997, **17**(6) :
- [9] P. Uraguhardt, Compound optical-fiber-based resonators. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, **A5**(6) : 803~ 812

Nonlinear Fiber Loop:

2. All-Fiber Optical Bistability Experiment with Er-Doped Optical Fiber

Song Qian Zhang Yuancheng

(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072)

(Received 6 June 1996; revised 9 September 1996)

Abstract Under the nonlinear optical condition the all-fiber optical bistability operation has been realized in an all-fiber resonator consisting of Er-Doped fiber and optical fiber couplers. The experimental bistability threshold is consistent with the theory.

Key words optical nonlinearity, optical bistability, Er-doped fiber.