

掺铒光纤吸收增加光学双稳态*

张远程¹⁾ 宋 蹇²⁾ 柯贤军¹⁾

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

摘 要 报道了的掺铒光纤中观测到的吸收增加非线性和无腔光学双稳运转。双稳是低功率的(亚毫瓦级)。分析了掺铒光纤吸收增加双稳态产生的机理。

关键词 掺铒光纤, 吸收, 光学双稳。

1 引 言

光学双稳(OB, Optical Bistability)和不稳性不仅在非线性学科基础研究领域具有重要意义^[1],而且在光信号处理方面,比如光信号放大^[2]、光存贮^[3]和光逻辑^[4]中有重要应用前景。不稳性还是影响某些激光系统正常工作的因素。众所周知,本征(全光)型光学双稳态有色散型和吸收型两大类,或两类兼而有之。稍后被人们发现的吸收增加型光学双稳态^[5]与前两类不同,该类光学双稳态不需要谐振腔,且呈现反相光滞回线。当光强增加至某阈值时,它由高透射态下跳至低透射态;当光强下降至某个更低阈值时,它由低透射态上跳至高透射态。这样,在作光逻辑时,增加了一个非(NOT)逻辑,即可充当光非门、与非门和或非门逻辑。

吸收增加型光学双稳态首次由 Hajto 等于 1983 年报道^[6]在非晶 GeSe₂ 中观测到,与稍后观察到的另几个实验一样,都是基于热效应,响应时间为 ms 级。后来有些文献报道了半导体薄片中的吸收增加光学双稳态具有纳秒级的高速响应。本文报道一种在光纤中观测到的吸收增加型光学双稳态现象。

2 掺铒光纤中的吸收增加非线性

作者利用掺铒光纤的高折射率非线性,实现了掺铒光纤的色散型光双稳运转^[7, 8]和光开关^[9],这表明,掺铒光纤有比普通光纤高得多的折射率非线性。最近,作者对一些厂家的掺铒光纤的吸收特性进行了实验观测,发现 91SN03 型号掺铒光纤具有极为明显的吸收增加非线性。这是一种高浓度的掺铒光纤,铒离子浓度高达 7.65×10^{-4} (依据厂家给出数据算出)。同时对一般的掺铒光纤也进行了同样测试,所得结果表明,其吸收增加效应很小,即其吸收系数在高光强时增加不多,基本上可看作一个常数。

* 国家自然科学基金高技术探索项目资助。

收稿日期: 1997-06-02; 收到修改稿日期: 1997-08-18

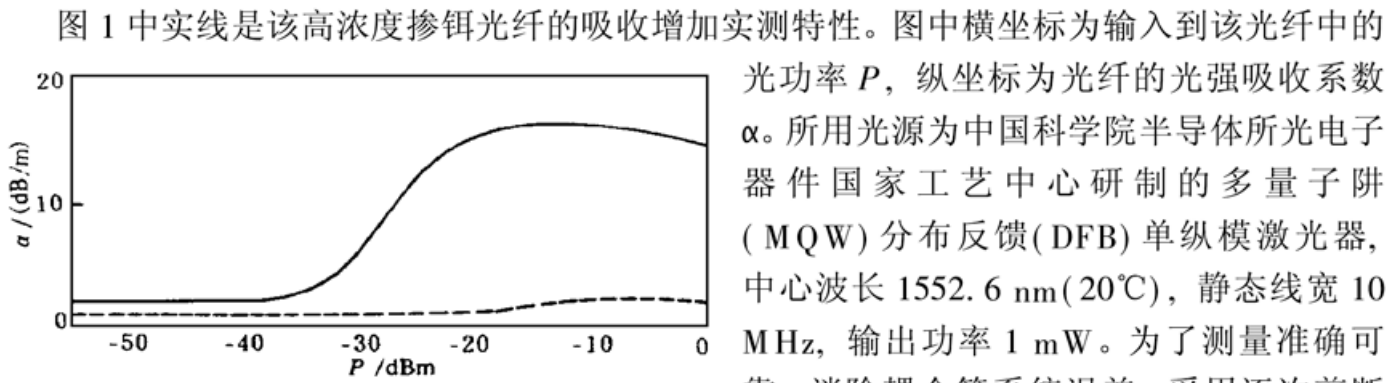


Fig. 1 Increasing absorption of high dense Er-doped fiber. 图中横坐标为输入到该光纤中的光功率 P ，纵坐标为光纤的光强吸收系数 α 。所用光源为中国科学院半导体所光电子器件国家工艺中心研制的多量子阱 (MQW) 分布反馈 (DFB) 单纵模激光器，中心波长 1552.6 nm (20°C)，静态线宽 10 MHz，输出功率 1 mW。为了测量准确可靠，消除耦合等系统误差，采用逐次剪断法，各次剪断部分长度大致相等并精确测量长度值，由此得出几套数据取平均，图中曲线为平均吸收曲线。可见，该光纤在低光强时为线性吸收区，其吸收系数保持一个低值，基本不随输入光强改变。此低值为弱光吸收系数 α_0 ，系通过对一条十几米长的该型号光纤在弱光下用剪断法测得。吸收系数 α 随输入功率急剧增加，亚毫瓦功率时呈现饱和。作为对照，图中虚线给出邮电部武汉邮电科学院生产的掺铒光纤 (铒离子浓度 4×10^{-4}) 的吸收特性，由图可知，这种掺铒光纤无明显吸收增加特性。

3 掺铒光纤吸收增加光学双稳态实验

利用上述分布反馈单纵模半导体激光器为光源，91SN03 掺铒光纤为吸收增加型非线性介质，观测掺铒光纤吸收增加光学双稳态的实验装置如图 2 所示。G 为激光器的脉冲激励电源，其脉冲上升和下降沿分别代表对光强的升、降动态扫描，以便送入掺铒光纤用示波器观测双稳回线；C 为 Y 型光纤耦合器，由邮电部武汉邮电科学研究院固体器件所生产，将 DFB 输出的扫描光分成两路，一路进入高浓度掺铒光纤 F；D₁、D₂ 均为 FCPO-40 型光电探测器，为中国科学院半导体研究所光电器件国家工程中心生产，光谱范围 (0.95~1.7) μm ，响应度 1.05 A/W (1.55 μm)；A₁、A₂ 为自制放大器，此二放大器结构、参数完全相同，经测试在所用信号范围内线性良好，无明显相位差；OSC 为 KIKUSUI COS5021 双踪示波器。Y 型光纤耦合器的另一路直接送入探测器 D₂，所形成的光电流代表掺铒光纤输入端光强的改变，经 A₂ 放大送入 OSC 的 X 轴输入端；掺铒光纤输出端光信号经 D₁ 探测，形成代表掺铒光纤透射光强的信号，经 A₁ 放大，送入 OSC 的 Y 轴输入端。

图 3 为实验示波照片。其中 (a) 为掺铒光纤输入 (上)、输出 (下) 波形，(b) 为 X-Y 显示出的双稳光滞回线，表明在同一输入光强 (横坐标) 下，回线上、下两枝确实对应两个不同的输出光强 (纵坐标) 值，分别对应系统的高透射和低透射两个稳态。仔细对照图 3(a)、图 3(b) 可知，图 3(b) 回线的高透射支 (上面一支) 对应输入光强增加时输出光强的变化；低透射支 (下面一支) 对应射入光强减少时输出光强的变化，也就是回线演化方向是顺时针的。众所周知，普通的色散/吸收型光学双稳态回线演化是逆时针的，这说明确实观测到一个反相光滞回线。在静态测试实验中，将激光器的直流光输出直接送入这段高浓度掺铒光纤，先逐步增加激光器输出光功率 (即掺铒光纤输入光功率)，用邮电部武汉邮电科学研究院固体器件所生产的 QGG06 型光纤耦合输入功率计，逐点测量掺铒光纤输入光功率；再逐步减少掺铒光纤输入功率并逐点测量其输出功率，发现在同一输入光强下，光强上升过程中系统的稳态功率均大于光强下降过程中系统的稳态功率。逐点静态描点观测结果与图 3(b) 基本一致。

输入光强增加和减少时系统状态的不同变化，表明系统具有光记忆或光存贮功能，而这

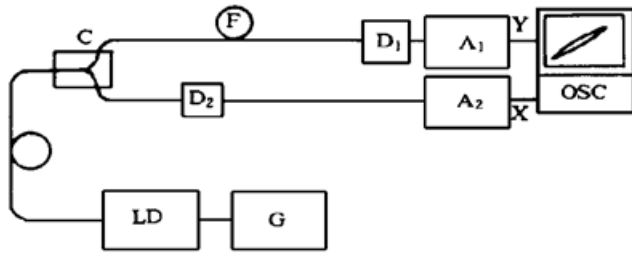


Fig. 2 Experimental setup

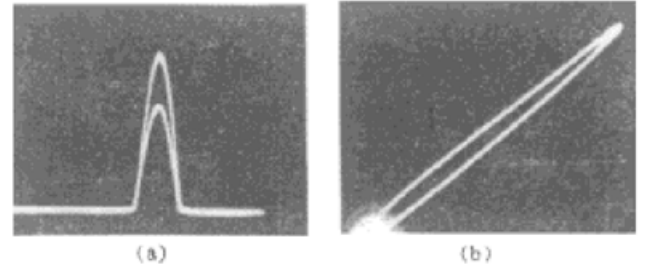


Fig. 3 Experimental oscilloscope photorgaphs. (a) In-
output waveform, (b) X-Y display

个系统仅是一段高浓度掺铒光纤, 不带有任何谐振腔。这与 Rossman 等观察到的没有谐振腔的 CdS 薄膜的激子透射的存贮效应^[2]属同一效应。

由图 3(b) 可见。这一吸收增加光纤双稳态, 其两个透射态的对比度不大。这是由于所用掺铒光纤的吸收增加特性还不够充分。因为吸收增加的一种物理机制是高浓度密集系统的合作行为^[11], 图 1 所示的吸收饱和特性表明, Er^{3+} 浓度还不够高, 以致高光强时粒子数耗尽才呈现饱和。这样, 在高光强时仍有较大透射, 造成系统不能明显跳变。但光滞回线仍明显呈现出来, 这正是吸收增加所导致的。

4 实验结果的理论解释

文献[5]已给出吸收增加型光学双稳态的工作原理。这里据此并结合所用介质高浓度掺铒光纤的实际情况, 对上述实验结果给出初步的理论解释。

实验所用光源波长 $1.55 \mu m$ 是 Er^{3+} 离子的强吸收峰, Er^{3+} 离子吸收 $1.55 \mu m$ 波长光子后, 便由其基态 $^4I_{15/2}$ 跃迁到第一激发态 $^4I_{13/2}$, 在 $^4I_{13/2}$ 能级上形成较大的布居。设输入到掺铒光纤中的光功率为 P , 被这段掺铒光纤吸收的光功率为 AP , 其透射(输出) 光功率为 $P_T = TP$, A 和 T 为掺铒光纤吸收和透射率。若忽略其他损耗, 显然 $A + T = 1$ 。

吸收光功率造成了这段光纤激发, 以激发程度 N 代表 $^4I_{2/13}$ 能级上的布居粒子数的增加, 显然有

$$N = \frac{\eta}{\hbar\omega}AP = \zeta AP \tag{1}$$

式中 ω 为激光光子角频率, $\hbar = h/2\pi$, h 为普朗克常数, η 为量子效率, $\zeta = \eta/\hbar\omega$ 为一常数。

实验所用高浓度掺铒光纤构成了 Er^{3+} 离子的一个高浓度密集系统, 所用 10MH 窄线宽光源构成一个外加强相干场, 正符合文献[11]所述外加强相干场下高密度系统原子间合作相互作用产生吸收增加双稳态的条件。图 1 所示吸收增加特性表明, 在上述双稳实验涉及输入光强范围 $(-40 \sim -10)$ dBm, 即 $(0.1 \sim 100) \mu w$ 内, 随着输入光强 P 的增加, 光强吸收系统 α 急剧增加。这导致长度为 L 的一段掺铒光纤的透射率 $T = \frac{P_T}{P} = \exp(-\alpha L)$ 急剧下降, 吸收率 A 急剧增加。

注意到(1)式, P 的增加必导致 N 的增加。所以在上述输入光强范围内, 吸收率

$$A = A(N) \tag{2}$$

是激发度 N 的急剧升函数; 透射率

$$T = T(N) \tag{3}$$

是激发度 N 的急剧降函数。由于 $T = 1 - A$, 这两个非线性函数的变化有互补的关系。

据上述分析和图 1 曲线, 可将函数(3)用图 4(a)中虚线表示, 图中纵坐标为透射率 T , 横坐标为激发度 N 。此曲线急剧下降的一段对应图 1 曲线急剧上升的一段。另由(1)式及关系 $T = 1 - A$ 可写出与 N 有另一直线的关系

$$T = 1 - A = 1 - \frac{N}{\mathcal{P}} \quad (4)$$

直线将有负的斜率, 此斜率反比于输入光功率 P 。图 4(a)示出了不同 P 下的几条直线。由图解不难看出, 当非线性特性(2)满足条件

$$\frac{dA}{dN} > \frac{A}{N} \quad (5)$$

时, 一些直线(如图中直线 c)与曲线有 3 个交点, 其中上、下两个交点分别对应系统的高透射态和低透射态两个稳定, 中间的交点对应不稳定。直线 b 和 d 与曲线只有两个交点, 其斜率分别对应于上跳变和下跳变阈值光功率, 其余直线都只有一个交点, 这样就形成图 4(b)的双稳回线。当输入光强改变时, 系统状态将如图示箭头方向(顺时针)改变, 说明系统确有较色散型和吸收型双稳态反相的光滞回线。

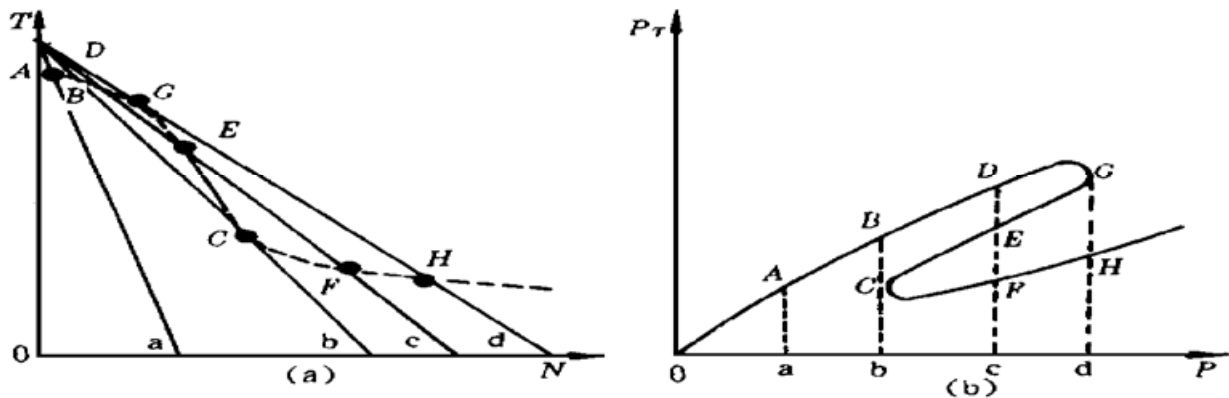


Fig. 4 Absorption increasing OB

结 论 利用一个高相干光源成功地观察到高浓度掺铒光纤的吸收增加非线性和光滞回线, 依据其特点, 判断为吸收增加型光学双稳态, 并给出了初步理论解释。

值得注意的是, 由于这里所观测的双稳现象是无腔的, 对有些场合, 例如掺铒光纤放大器来说, 由于运转功率并不高, 所以它有可能给掺铒光纤放大的工作造成不稳定的因素, 从而使这一现象的深入研究增加了必要性。

参 考 文 献

- [1] H. Nakutsuka, S. Asaka, H. Itah *et al.*, Observation of bifurcation to chaos in an all-optical bistable system. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, **50**(2) : 109~ 112
- [2] F. A. P. Tooley, High gain signal amplification in InSb transpher at 77 K. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(90) : 807~ 811
- [3] H. Rossman, F. Henneberg, J. Voiget, Memory effect in the excitonic transmission of CdS. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1983, **115**(1) : k63~ k67
- [4] 张远程, 宋 骞, 何绍伟, 半导体激光双稳态光逻辑和信号处理. *激光杂志*, 1992, **13**(1) : 4~ 7
- [5] H. M. Gibbs, *Optical Bistability, Controlling Light with Light*, Academic Press, Inc., 1984 : 80~ 82

- [6] J. Hajto, I. Janossy, Optical bistability observed in amorphous semiconductor films. *Philos. Mag. (B)*, 1983, **47**(4) : 347~ 366
- [7] Song Qian, Zhang Yuancheng, Er-doped fiber optical bistability by Ar-laser. *Wuh. Univ. J. Nat. Sci.*, 1996, **1**, **2** : 203~ 207
- [8] 宋 骞, 张远程, 氩离子激光掺铒光纤双稳态. *中国激光(A)*, 1996, **23**(8) : 719~ 721
- [9] 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
- [10] R. A. Betts, T. Tjugiarto, Y. L. Xue, P. L. Chu, Nonlinear refractive index in erbium doped optical fiber: Theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(4) : 908~ 913
- [11] C. M. Bowden, C. C. Sung, Cooperative transients in inter-atomic correlation in the presence in the presence of an externally applied coherent field: Relation to intrinsic mirrorless optical bistability. *Proc. SPIE*, 1982, **317** : 276~ 279

Absorption Increasing Optical Bistability Using Er-Doped Fiber

Zhang Yuancheng¹⁾ Song Qian²⁾ Ke Xianjun¹⁾

1), *Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072*
2), *College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072*

(Received 2 June 1997; revised 18 August 1997)

Abstract The observation of increasing absorption nonlinearity and bistability without cavity in Er-doped fiber is reported. The operation power is low (sub-milliwatts). The mechanism of Er-doped fiber in-creasing absorption optical bistability is analysed.

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