

文章编号: 0253-2239(2007)04-0583-4

掺铒光纤中的双稳态现象的研究*

沈立君 沈启舜 邵加峰 李抒乐 曹庄琪

(上海交通大学物理系, 上海 200240)

摘要: 在以掺铒光纤为增益介质的环形光纤激光器中观察到了光学双稳态现象, 定性分析了双稳态形成的机理, 即掺铒光纤不同位置分别存在增益饱和和吸收饱和, 而且吸收饱和有着更低的饱和阈值。通过理论衍生的公式对增益特性曲线进行了拟合, 并结合增益特性曲线对光双稳态的产生给出了定量的解释。

关键词: 光纤光学; 光学双稳态; 掺铒光纤; 环形光纤激光器; 增益特性

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Bistability Phenomenon in Erbium-Doped Fiber

Shen Lijun Shen Qishun Shao Jiafeng Li Shule Cao Zhuangqi

(Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: Optical bistability is observed in a fiber ring laser with erbium-doped fiber (EDF) as the gain medium. A qualitative explanation about the mechanism of optical bistability is put forward, i. e. the long erbium-doped fiber can be divided into two different parts, where gain saturation and absorption saturation prevails respectively and the absorption saturation has a lower saturation threshold. Furthermore, the gain characteristic of EDF is measured and fitted with a formula derived from the qualitative explanation. At last, a quantitative explanation of the optical bistability is put forward with the gain characteristic of the erbium-doped fiber.

Key words: fiber optics; optical bistability; erbium-doped fiber; fiber ring laser; gain characteristic

1 引言

由于光学双稳态在光学逻辑器件、光开关、光存储器等方面的潜在应用价值, 一直以来它都是光学领域研究人员的一个重要研究内容, 有关它的研究, 最早出现在气体激光器中。随着各种增益介质的陆续使用, 光学双稳态也在各种激光器中被观察到, 并得到了广泛的研究。如今, 随着光通信领域技术的发展, 基于光纤的激光器、光纤放大器得到了广泛的使用, 而出现在光纤增益介质中, 特别是掺铒光纤中的双稳态现象^[1~3] 特别令人关注, 也获得了许多成果。Yuri Mitnick 等^[4] 提出了掺铒光纤环形腔中利用双向抽运的干涉效应产生双稳态, 给出了相应的理论; Y. H. Ja^[5] 利用相似的原理也从实验上得出

了类似结论; Francisco J 等^[6] 利用复合环结构也产生了双稳态。

本文实验上利用包含掺铒光纤的环形光纤激光器结构得到了明显的双稳态现象, 并从理论上解释了双稳态出现的机制, 实验和理论取得了一致的结果。

2 实验及其结果

掺铒光纤环状激光器如图 1 所示。环形激光器由一段掺铒光纤、一个波分复用器, 一个滤波器、一个 10/90 的耦合器和一个隔离器组成。掺铒光纤 (EDF) 长 20 m、掺杂浓度为 1.0×10^{-4} ions/cm³; 将 980 nm 的抽运光引入光纤环; 滤波器是个中心波长为 1553 nm, 带宽为 200 GHz 的窄带滤波器; 使用

* 上海市科委发展基金(05DZ22006)资助课题。

作者简介: 沈立君(1982-), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要从事光纤光学、激光器等方面的研究。

E-mail: shady@sjtu.edu.cn

导师简介: 沈启舜(1947-), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要从事导波光量子学方面的研究。

E-mail: qsshens@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-05-18; 收到修改稿日期: 2006-08-14

一个 10/90 的耦合器将光纤环中产生的激光功率耦合输出；隔离器用以保证光纤环的单向传播，避免后向的放大自发辐射(ASE)。

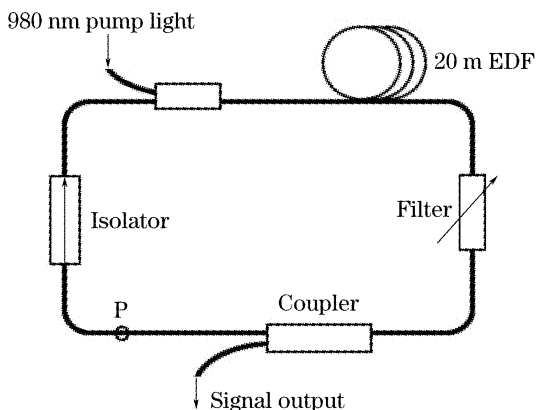


图 1 光纤环形激光器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the fiber ring laser

图 1 是一个典型的掺铒光纤激光环，由 980 nm 的激光抽运激发产生 C 波段 1553 nm 的激光，而且能够观察到明显的双稳态现象。

具体的实验结果如图 2 所示。增强 980 nm 抽运激光器的注入电流，直到 98.2 mW 时，激光环激发出 1550 nm 左右的激光，继续增强抽运电流，激光光强增大。此时若减小抽运电流，激光并不消失，而是逐渐减小，直到注入电流减小到 70.5 mW 以下时，激光才被抑止。双稳态的区间为 98.2—70.5=27.7 mW，激光的信噪比达到了 40 dB。另外，输出激光的线宽小于 0.1 nm，由于仪器的分辨力无法更精确的测量。

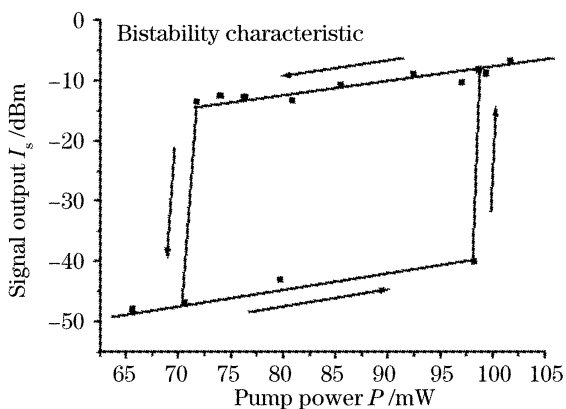


图 2 掺铒光纤中双稳态的实验结果

Fig. 2 Experimental result, pump power versus signal output in erbium-doped fiber

为了了解双稳态的产生机理，必须了解掺铒光纤的增益特性。测量掺铒光纤增益特性的实验装置如图 3 所示。将激光环从(图 1)P 点截断。使用一台波长、功率可调的窄线宽可调谐激光器(线宽小于 0.1 nm)，从 P 点沿原来环的顺时针方向输入波长为 1553.911 nm 信号光，在不同的抽运光光强下，

改变输入信号光功率，记录从 10/90 的耦合器输入的信号光功率以了解原来激光环的增益特性。结果如图 4 所示。

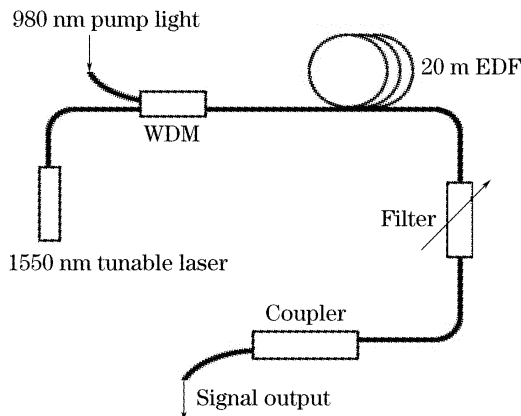


图 3 测量掺铒光纤增益特性曲线的实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup for testing the gain characteristic of erbium-doped fiber

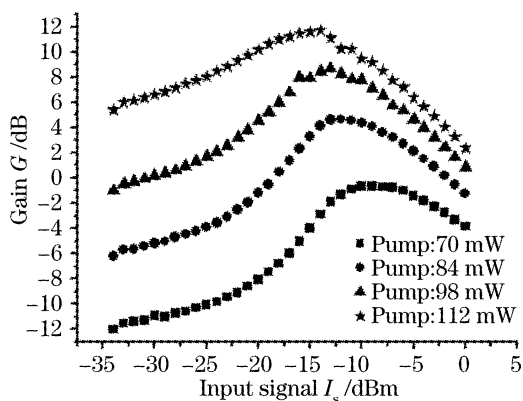


图 4 掺铒光纤的增益特性

Fig. 4 Gain characteristic of erbium-doped fiber

3 理论解释

光纤环中的双稳态现象取决于光纤环的增益特性。而图 4 中所示的激光环增益特性是源于 20 m 长的掺铒光纤的增益饱和和饱和吸收效应的共同作用。

增益饱和效应是指信号光光强很大，大量消耗反转粒子数从而使得增益介质增益下降的现象；饱和吸收现象则是指信号光光强很大，增益介质吸收了少量信号光导致下能级粒子数大量减少从而使得吸收损耗下降的过程。由于 980 nm 抽运光较高的抽运效率，抽运光在进入掺铒光纤后一段距离(10 m 左右)后便被吸收殆尽，余下的一段掺铒光纤由于没有抽运光，增益远小于吸收，充当了一个吸收体的作用。图 4 所示的增益特性中，当外加的信号光功率逐渐增大，吸收体首先饱和，即饱和吸收，腔内的吸收损耗迅速下降，从而光纤环的增益曲线上升；进一步加大信号光的光功率，掺铒光纤前端的

增益区的增益逐渐饱和,其增益迅速下降,整个光纤环的增益下降。这两个作用的结果就是使整个光纤环的增益随着输入信号光强的增加呈现出如图 4 所示的先上升后下降的过程。

掺铒光纤在有/无抽运光情况下的增益、吸收特性其实是同一物理过程的两个方面,可以由三能级模型加以描述,通过解速率方程可以得出其单位长度的增益和吸收为^[7~9]

$$G = N_t \sigma_s \frac{\eta_s I_p - 1}{1 + I_s + I_p}, \quad (1)$$

式中 N_t 为增益介质中总的粒子数, σ_s 为增益介质对信号光的吸收截面, η_s 为发射截面和吸收截面之比, I_s, I_p 分别为信号光、抽运光的光强。当没有抽运光时, $G < 0$, G 为吸收。通过(1)式,也很容易地得出掺铒光纤的增益和吸收都存在饱和,而且不同抽运强度时,饱和的阈值也不同。根据以上理论,可以拟合出图 4 中数据所示的曲线。

系统总增益为增益区增益减去吸收区的吸收,假定增益区的长度为 L (m),则吸收区的长度为 $20 - L$ (m),由于测得的信号光强度数据都采用对数单位,所以(1)式可改写为

$$G_t = L \times N_t \sigma_s \left(\frac{\eta_s I_p - 1}{1 + I_p} \right) \frac{1}{1 + 10^{0.1 \cdot I_s(\text{dBm})} / (1 + I_p)} - (20 - L) \times N_t \sigma_s \frac{1}{1 + 10^{0.1 \cdot I_s(\text{dBm})} / (1 + I_p)}. \quad (2)$$

根据(2)式对图 4 中的数据点进行拟合,实际的拟合公式为

$$G = P_5 + \frac{L \times P_1}{\exp[0.1 \cdot (I_s - P_3)] + 1} - \frac{(20 - L) \times P_2}{\exp[0.1 \cdot (I_s - P_4)] + 1}, \quad (3)$$

其中 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 和 L 是所需要拟合的变量。对比(1)式 ~ (3)式可得这些变量的物理意义:

$P_1 \equiv N_t \sigma_s \left(\frac{\eta_s I_p - 1}{1 + I_p} \right)$, P_5 表征增益区的增益能力, $P_2 \equiv N_t \sigma_s$ 表征吸收区的吸收能力, $P_3 \equiv 10 \lg(1 + I_p)$ 是增益区的增益饱和阈值(单位为 dBm), P_4 为根据增益饱和阈值而引入的吸收区的饱和吸收阈值(单位为 dBm)。

拟合的结果如图 5 中的实线所示,各拟合参量见表 1。

表 1 拟合结果
Table 1 Fitting result

Pump power /mW	P_1	P_2 (shared)	P_3	P_4	P_5	L
70	4.09		-8.00	-12.59	-5.74	6.78
84	2.24	2.54	-8.10	-15.17	-3.21	10.05
98	1.31		-7.03	-17.83	-1.44	13.32
112	0.89		-5.70	-21.84	-0.35	16.43

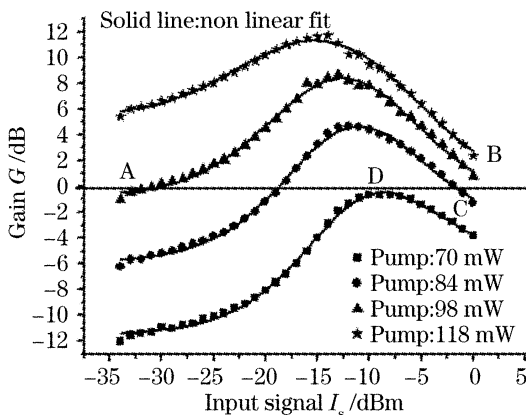


图 5 双稳态形成机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the mechanism for the bistability phenomenon in erbium-doped fiber ring laser

观察表 1 中的数据,可得:

- 1) 在各个不同抽运光强下, $P_4 < P_3$, 即吸收阈值小于增益阈值。
- 2) 随着抽运的增加, P_5 不断的增加,即系统没

有饱和效应时的增益同随着抽运强度的增加而增加。

3) L 随着抽运的增强而几乎线性的增加,说明抽运光的增强导致掺铒光纤增益区长度不断增加而掺铒光纤吸收区长度不断减小,正是这个原因,图四中的抽运强度越大曲线越趋于平坦。

根据已有的光纤环在不同抽运强度下的增益特性曲线,可以解释闭环时的双稳态现象^[10]。在图 4 中画一条平行于 x 轴的直线,表示系统的损耗(接入损耗等),如图 5 所示。

一开始,光纤环内还没有形成激光,此时内部信号光很弱,处于增益特性图左侧的小信号增益区,抽运强度若小于 A 点所处大小(98 mW),损耗大于增益,都不会有形成激光,一旦抽运大于 A 点数值,环内产生激光,激光强度便会大大增强,到达增益特性图右侧的大信号增益区,信号强度增大到 B 点位置。此时若降低抽运强度(如降至 84 mW),仍能够找到增益等于损耗的 C 点,信号光较 B 点虽有下降

但仍然很大。进一步减小抽运(到 70 mW),增益的峰值同损耗一样大,信号较 C 点小,到达 D 点。此时再减小抽运将无法再维持足够的增益,激光消失。由于产生激光的抽运阈值电流和消失激光的抽运阈值不同,形成了光学双稳态现象。

对于如图给定的损耗,激光开始振荡和停止振荡的抽运强度分别由小信号区和大信号区与损耗直线相切的点 A、D 所处的抽运强度决定(A: 98 mW 到 D:70 mW)。

4 结 论

在实验上观察到环形掺铒光纤激光器中较强的光学双稳态现象,输出光波长为 1553 nm 时双稳态区间达到了 27.7 mW。基于掺铒光纤的增益饱和和吸收饱和的特性,定性分析了双稳态现象的形成机理。实验上测量了掺铒光纤的增益特性,在双稳态形成机理的基础上,通过理论衍生的公式对增益特性曲线进行了拟合,拟合结果同实验结果和理论解释保持一致。最后,结合增益特性曲线对双稳态的产生给出了定量的解释。

参 考 文 献

1 Lu Guohui, Ye Hongan, Li Junqing *et al.*. Optical bistability in frequency domain based on tunable fiber laser and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(5): 37~42 (in

Chinese)

吕国辉,叶红安,李俊庆等. 基于可调谐光纤激光器的频域光纤光学双稳态及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(5): 37~42

- 2 Zhang Yuanchen, Song Qian, Ke Xianjun. Optical bistability due to absorption increase in erbium-doped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1459~1463 (in Chinese)
张远程,宋 骞,柯贤军. 掺铒光纤吸收增加光学双稳态[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1459~1463
- 3 Song Qian, Zhan Yuanchen, Li Jixing *et al.*. Optical bistability in erbium-doped fiber under a Ar-ion laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **A23**(8): 719~721 (in Chinese)
宋 骞,张远程,李吉星等. 氩离子激光掺铒光纤的双稳态[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(8): 719~721
- 4 Yuri Mitnick, Moshe Horowitz, Baruch Fischer. Bistability in cavities with erbium-doped fiber amplifiers due to bidirectional pump-beam interference[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(8): 2079~2082
- 5 Y. H. Ja. Single-coupler optical fiber ring resonator using degenerate two-wave mixing with a depleted pump beam: circulating and output intensities and bistability[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **10**(7): 1208~1220
- 6 Francisco J. Fraile-Peláez, José Capmany, Miguel A. Muriel. Transmission bistability in a double-coupler fiber ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12): 907~909
- 7 Keigo Iizuka. *Elements of Photonics* [M]. Volume II, John Wiley & Sons, Inc, Chapter 13
- 8 A. A. M. Saleh, R. M. Jopson, J. D. Evankow *et al.*. Modeling of gain in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(10): 714~717
- 9 C. Randy Giles, Emmanuel Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifier[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283
- 10 Jung Mi Oh, Donghan Lee. Strong optical bistability in a simple L-band tunable erbium-doped fiber ring laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(4): 374~377