

文章编号: 0258-7025(2003)04-0311-04

光纤激光器的混沌现象分析

谭中伟, 刘 艳, 傅永军, 宁提纲, 裴 丽, 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 利用混沌理论对光纤激光器的稳定性进行了分析, 由此得到了避免出现混沌现象的条件, 为提高光纤激光器的稳定性提供了理论指导。在实验中观察到阵发混沌现象的发生, 并用理论分析得出的结论对光纤激光器进行调整, 最终避免了混沌现象的发生。

关键词 光电子学; 光纤激光器; 混沌; 光纤光栅

中图分类号 O 415.5 **文献标识码** A

Analysis of Chaotic Phenomena in the Fiber Laser

TAN Zhong-wei, LIU Yan, FU Yong-jun, NING Ti-gang, PEI Li, JIAN Shui-sheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Based on the chaotic theory, the conditions to avoid chaotic phenomena in fiber lasers are achieved. The chaotic phenomena occurred in the experiment. By adjusting the fiber laser according to the conclusion of this analysis the chaotic phenomena disappeared finally.

Key words optoelectronics; fiber laser; chaotic; fiber grating

1 引 言

目前通信用激光器主要是半导体激光器, 但它存在着成本高、与系统的传输光纤耦合困难等缺点。而光纤激光器是光纤通信系统中另一种很有前途的光源, 与半导体激光器相比, 它具有成本较低、线宽窄、容易把激光耦合到光纤, 在 380 nm~3.9 μm 带宽范围内实现激光输出以及波长选择容易且可调谐等优点。自从 20 世纪 80 年代英国 Southampton 大学的 S. B. Poole 等用 MCVD 法制成了低损耗的掺铒光纤以来, 光纤激光器已成为研究的热点^[1]。

但是, 目前光纤激光器存在的一个致命的弱点就是不稳定, 能否解决光纤激光器的稳定性问题是决定光纤激光器能否走向实用化的关键。在实验中观察到了光纤激光器中出现的阵发混沌现象, 本文利用激光单模振荡的 Lorentz 模型对该现象进行了理论分析, 得到了避免出现混沌现象的条件, 并根据

理论分析得出的结果对实验进行调整, 通过改变激光器超阈值, 最终避免了光纤激光器中的阵发混沌现象, 制成了功率波动较小的光纤激光器。

2 理论分析

加上弛豫系数后的 Bloch 方程的表达式^[2]

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{T_2}u + \left(\delta\omega - \frac{\partial\phi}{\partial t}\right)v \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{T_2}v - \left(\delta\omega - \frac{\partial\phi}{\partial t}\right)u + \frac{2\mu E}{\hbar}\Delta \\ \frac{\partial \Delta}{\partial t} &= -\frac{\Delta - \Delta_0}{T_1} - \frac{2\mu E}{\hbar v}\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $u = \sigma^- e^{i\omega t} + \sigma^+ e^{-i\omega t}$, $v = i(\sigma^- e^{i\omega t} - \sigma^+ e^{-i\omega t})$, σ^+ , σ^- 分别为电子的上升和下降算符, Δ 为反转粒子数。在单模振荡且振荡频率与原子跃迁频率为共振时, Bloch 方程可简化为下式

$$\dot{X} = -\sigma(X - Y)$$

收稿日期: 2001-12-28; 收到修改稿日期: 2002-06-27

基金项目: 国家高技术 863 项目资助(编号: 2001AA312230)。

作者简介: 谭中伟(1978—), 男, 北方交通大学光波所博士研究生。主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: wztan@sinoi.com

$$\begin{aligned}\dot{Y} &= -Y - XZ + rX \\ \dot{Z} &= XY - bZ\end{aligned}\quad (2)$$

其中, $X = \sqrt{b\lambda} \frac{E}{E_s}$, $Y = \sqrt{b\lambda} \frac{v}{v_s}$, $Z = \frac{\Delta_0 - \Delta}{\Delta_s}$, $\sigma = v_c T_2$, $b = \frac{T_2}{T_1}$, $r = \lambda + 1 = \frac{\Delta_0}{\Delta_s}$, 这与描写对流的 Lorentz 方程完全一致。可以从这个方程出发分析其不动点和稳定性。

P. Manneville 等^[3]用数值方法求解了 Lorentz 方程,研究了 Y 分量随时间的变化:当 $r < r_c = \sigma \frac{\sigma + b + 3}{\sigma - b - 1}$ 时, $Y(t)$ 随着时间 t 的周期振荡;当 $r > r_c$ 时,周期振荡被一些偶发的混沌脉冲所中断;当 r 继续增大时,这种偶发混沌脉冲越来越频繁,以至覆盖了整个周期振荡区。这与实验中出现的现象相吻合。由于 $r = \lambda + 1 = \Delta_0/\Delta_s$,所以混沌现象的出现是与抽运的超阈值直接相关的,减小抽运的超阈值就可以减弱或避免阵发混沌的影响。

为了制作性能稳定的光纤激光器,自然不希望发生阵发混沌现象,所以应该适当调节光纤激光器的参数,使之远离发生阵发混沌的条件。由上述分析可知,只要满足条件 $r > r_c$ 就可能发生阵发混沌。要减小抽运的超阈值,避免阵发混沌发生有两种方法,即减小抽运或增大激光器的阈值。减小抽运的做法是简单的,但是实际中抽运功率是由输出功率的需要来决定的,因而,只有增大激光器的阈值是可行的。激光器振荡的阈值条件是: $G = a - \ln \frac{1}{2l} \ln r_1 r_2$, 其中 r_1, r_2 分别为两个端面的透过率。要增大激光器的阈值,一个简单的方法是减小反射面的反射率,增大透过率。根据激光器的基本理论,增大透过率一方面有利于激光的输出,但在另一方面又增大了谐振腔的损耗,提高了阈值,降低了输出功率,这是相互矛盾的两个方面。透过率和输出功率之间的相互关系如图 1^[4]。

图 1 中, t 为透过率, P 为输出功率,存在一个最佳透过率 t_m , 在该点取得最大的输出功率 P_m , 根据上文对混沌发生条件的分析,为了避免发生混沌现

象,可以把透射率适当增大,但这要以牺牲一定的抽运效率或效率为代价。

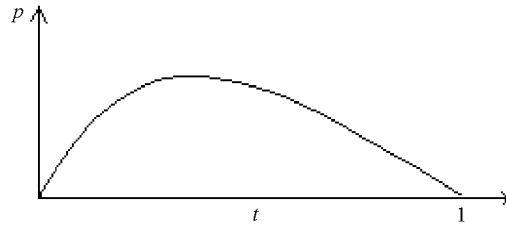


图 1 输出功率和透射率之间的关系

Fig. 1 Relationship between the output power and the transmission

3 实 验

按照不同结构来分,光纤激光器主要分为环形光纤激光器、分布反馈(DFB)光纤激光器和分布布拉格反射(DBR)光纤激光器。分布反馈光纤激光器^[4]的优点是只用一个光栅来实现光反馈和波长选择,因而频率稳定性更好,结构也最为简单,但是由于掺铒光纤纤芯所含 Ge 很少或没有,光敏性差,所以 DFB 光纤激光器很难制作;使用环形光纤激光器^[5]能克服增益介质的空间烧孔效应,但是因为所用掺铒光纤较长(几米或几十米),模式间隔小,常发生模式跳跃,而且结构复杂,需要一些价格昂贵的元件。DBR 光纤光栅激光器^[6]利用光纤光栅作选频元件,可以将普通光纤光栅熔接在掺铒光纤的两端构成谐振腔,简单易行。

制作了一个 DBR 光纤激光器,其结构如图 2。图中,用作反射镜的光纤光栅是反射率分别为 95% 和 80% 的光栅,其中一个光栅直接写在铒光纤上以减少腔内损耗。OSA 为光谱分析仪,OI 为光隔离器,FS 为熔接点,WDM 为波分复用器,EDF 为掺铒光纤。利用 WDM 给铒光纤提供 980 nm 抽运,铒光纤光栅一端有大约 40 cm 的尾纤,吸收部分残留的抽运光对输出激光有放大作用。输出端加上隔离器以避免反射光影响激光器的稳定;出于同样的考虑,光纤端面磨成 10° 角。

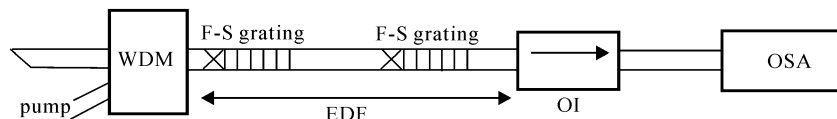


图 2 DBR 光纤激光器结构示意图

Fig. 2 Structure of the DBR fiber laser

当抽运功率为 90 mW 时得到了光谱如图 3 所示的激光, 所用光谱仪型号为 ANDO AQ6317。输出峰值波长为 1546.327 nm 激光与光栅的布拉格波长一致, 其光谱是稳定的。激光的谱宽为 0.014 nm。图 4 用光谱仪记录了在不同抽运功率作用下产生的激光光谱(由近到远功率由 10 mW 逐渐增加到 100 mW)。

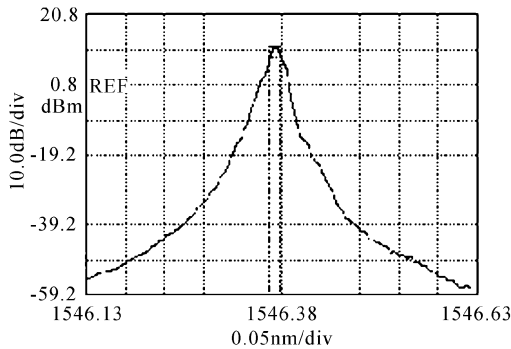


图 3 光纤激光器输出光谱

Fig. 3 Spectrum of the fiber laser

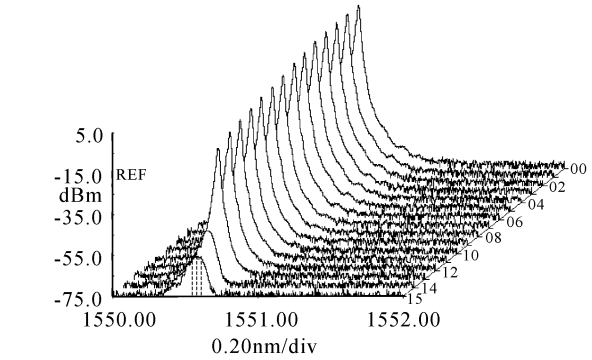
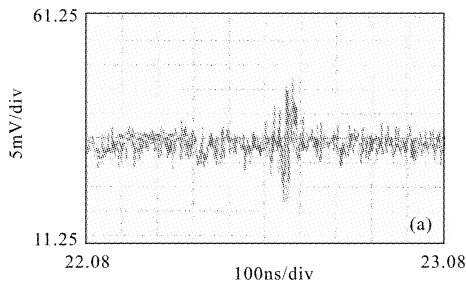


图 4 不同抽运功率下光纤激光器输出光谱

Fig. 4 Spectrum of fiber laser in different pump

但用功率计 ILX Lightwave OMM-6810B 对输出功率进行测量, 输出功率为 7.7 mW, 却发现每隔一段时间(从 1 min~10 min 不等)输出功率会突然发生无规则的剧烈变化, 除此之外功率基本保持稳定。由于功率波动是突发性的, 发生时间很短, 故用光谱仪观察不到。把激光器在恒温下运行 2h 以

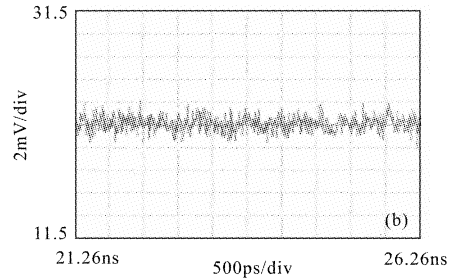


图 5 光纤激光器输出功率

Fig. 5 Output power of fiber laser

(a) pump=90 mW; (b) pump=40 mW

后再观察, 这种没有周期性的突变仍然存在; 又在谐振腔中引入了偏振控制器, 但仍然无法消除这种现象。而抽运的输出一直是基本保持稳定的, 因此可以推断这是一种阵发混沌现象。用通信信号分析仪观察激光器的输出直流波形, 捕捉到这种突发性的波动, 其发生的频率和间隔时间是随机的, 如图 5 (a) 所示。由上文得出结论, 只要降低超阈值就能消除阵发混沌的影响, 因此适当地降低了抽运功率, 观察到抽运功率降低到一定程度就观察不到阵发混沌了, 如图 5 (b) 所示。但为了得到较大的输出功率, 必须考虑其他的方法, 就是增大激光器的阈值。把输出端的光纤光栅换成反射率仅为 70%, 这时, 把抽运功率恢复到 90 mW, 观察了 2 h, 没有发现阵发混沌现象, 这时的输出功率为 7.5 mW。可以相应

增加抽运功率, 来提高输出功率, 把抽运功率增大到 110 mW, 得到了 8 mW 的稳定输出。最后测得光纤激光器的输出功率波动小于 0.045 dB。

参 考 文 献

- 1 S. B. Poole, D. N. Payne, M. E. Fermann. Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(17):737~738
- 2 Tan Weihan. Influence of detuning on the butterfly effect of laser oscillation [J]. *Physics (物理)*, 1994, **23**(8):473~478 (in Chinese)
- 3 P. Manneville, Y. Pomeau. Intermittency and the Lorenz model [J]. *Phys. Lett.*, 1979, **A75**(1):1~2
- 4 Zhou Yinghua, Sun Jingheng. The Physics of Laser [M]. 1991. 190~193 (in Chinese)
- 5 M. Sejka, P. Varming, J. Hübner *et al.*. Distributed feedback Er³⁺-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17):1445~1447

6 K. Iwatsuki, H. Okamura, M. Saruwatari, Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fibre ring-laser with 1.4 kHz

linewidth [J]. *Electron. Lett.*, 1990, 26 (21): 2033 ~ 2035

近红外强激光诱导 KCl 晶体的 F 心

一般卤素化合物晶体在可见光区域是透明的, 经过合适的化学或物理方法处理, 可在晶体中形成色心而具有特有的颜色。常用的物理方法是短波长紫外线辐照或射线辐照(X 射线, γ 射线或电子束射线)。通常经这些辐照方法处理后, 可使卤素化合物晶体样品均匀着色。

自上世纪 90 年代以来, 人们对超快强激光(经聚焦后的超短脉冲激光束)与材料的相互作用表示出了极大的兴趣。许多实验事实证明, 这种超快强激光可诱导材料结构上的显微改性, 并认为玻璃材料的结构较之晶态材料具有可塑性: 用这种强激光与玻璃态材料相互作用后, 使玻璃在不改变组份的条件下, 结构被改性部分改变为原有的光、电、机械及磁性, 使原有的材料成为含有某种功能微结构的材料。本研究小组经近几年研究工作的积累及深入的研究, 认为这种超快强激光对不同类型的晶态材料也会有不同的结果。最近用 Ti:Al₂O₃ 激光器产生的输出波长为 800 nm, 脉宽为 120 fs, 重复频率为 1 kHz, 平均功率为 14~48 mW 的强激光与 KCl 晶体相互作用, 选择性地在 KCl 晶体中的被作用区诱导产生色心。图 1 中的黑色区(实际颜色为蓝色)即经一定功率密度的超快强激光扫描后, 在 KCl 晶体中形成的色心。图 2 为该色心区域的吸收光谱, 其中各吸收峰的峰值位置从短波长到长波长都与 KCl 晶体中的 V₃ 心, F 心, R₁ 心, R₂ 心, M 心及 N 心相对应。除 V₃ 心的峰值位置有紫移外, 其他各色心吸收峰的峰值位置都有红移现象。与以往在卤素化合物晶体中产生色心的辐照方法相异之处是我们用近红外超快强激光在卤素化合物晶体中诱导产生了色心。

本研究结果表明, 利用超快强激光所具有的极高时间、空间分辨率的特性, 以它在卤素化合物晶体中产生的色心为载体, 可使合适的卤素化合物晶体成为一种三维高存储密度材料; 也可在合适的卤素化合物晶体中形成有特殊功能的点缺陷的功能微结构, 使其在全光学集成回路中得到应用。

目前, 我们正对用近红外超快强激光在卤素化合物晶体中诱导产生色心的机理做进一步研究, 对

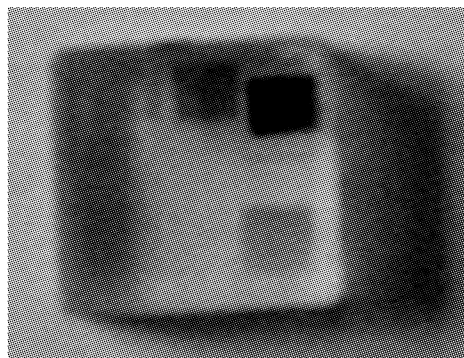


图 1 经超快强激光辐照后 KCl 晶体中选择性地形成的色心区
黑色(实际颜色为蓝色)的深浅不同是辐照剂量不同造成
Fig. 1 Space-selective color center region in the KCl crystal by an ultrashort pulse laser
The dark level of color depends on the radiation dose

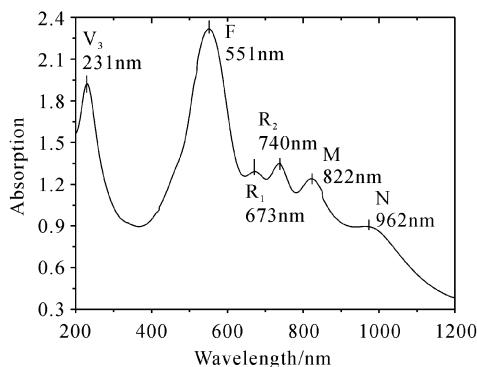


图 2 用 JASCO V-570 吸收光谱仪测得的 KCl 晶体中色心区的吸收光谱
Fig. 2 Absorption spectrum of the color center in KCl with JASCO V-570 absorption spectrometer

吸收光谱中各谱峰值发生位移的原因亦将作进一步的探讨。

中国科学院上海光学精密机械研究所,
Photon Object 实验室, 上海 201800
潘守夔, 袁清习, 姜雄伟, 邱建荣,
陈庆希, 宋秀冬, 朱从善
收稿日期: 2003-03-17