

# 掺铒光纤激光器中自脉冲的控制\*

孙军强 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

**摘 要** 在实验中观察到了掺铒光纤激光器中自脉冲, 并通过加反馈的方法控制了自脉冲。在理论上利用带反馈的两激光器的耦合模型, 成功地解释了自脉冲的产生及其控制的物理机制。结果表明, 掺铒光纤激光器中两正交偏振态的反馈及其耦合对光脉冲的形成及控制的重要性。

**关键词** 掺铒光纤激光器, 自脉冲, 控制。

掺铒光纤作为新颖的激光光源和光放大器中的增益介质, 在光纤通信系统中获得了广泛的应用, 已引起了人们普遍的重视。除了在光纤通信系统中研究掺铒光纤外, 应用掺铒光纤作为激光增益介质来研究激光非线性动力学具有重要的意义。因铒离子的亚稳态寿命长达  $1 \sim 10 \text{ ms}$  且光纤芯区功率密度高, 使观察激光器由连续工作状态过渡到自脉冲乃至混沌等非线性动力学现象非常方便<sup>[1]</sup>。光纤激光器的长腔长及光纤不可能完全各向同性, 因而激光场在光纤中传输时不可避免地引起偏振效应, 而且光纤中的两正交偏振态在传输过程中会相互耦合或转化<sup>[2]</sup>。Leners 等人<sup>[3, 4]</sup>在  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂的光纤激光器中已观察到了由于偏振效应引起泵浦光与输出激光场具有一定的静态关系及反相位动力学(两正交偏振光相位差  $\pi$ ) 现象。Lacot<sup>[5]</sup>等人观察到了掺铒光纤激光器中的非线性动力学过程, 并建立了相干泵浦两耦合激光器的半经典理论模型, 解释了掺铒光纤激光器的自脉冲及反相位乃至激光混沌的非线性动力学现象。

本文提出了一种新颖的加反馈的环形掺铒光纤激光器, 在实验中观察到了自脉冲现象, 利用控制反馈激光场的大小, 成功地稳定了光纤激光器的自脉冲, 并应用带反馈的理论模型清晰地解释了激光器系统对激光场反馈的重要性, 理论和实验结果获得了较好的吻合。

## 1 自脉冲环形掺铒光纤激光器的实验描述

环形掺铒光纤激光器的结构示意图如图 1 所示, 掺铒光纤由波长为  $1.47 \mu\text{m}$  的半导体激光器(LD<sub>1</sub>)泵浦, 泵浦光由  $1.47 \mu\text{m}/1.53 \mu\text{m}$  波分复用(WDM)耦合器进行耦合。20% 的光纤耦合器输出的激光由单色仪、光功率计及 7904 示波器作监视。在光纤环中引入偏振控制器, 目的是调整光纤环中传输的激光场的偏振态。光纤耦合器的“4”端同作为反馈的特殊半导体

\* 本项目得到国家自然科学基金资助。

收稿日期: 1995 年 5 月 1 日; 收到修改稿日期: 1995 年 10 月 23 日

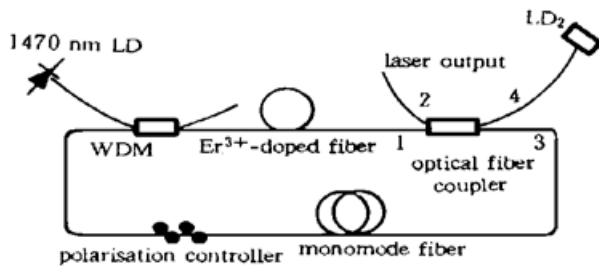


Fig. 1 Experimental setup of an Er<sup>3+</sup>-doped fiberring laser

材料 LD<sub>2</sub> 相耦合, 可通过改变加在 LD<sub>2</sub> 上的偏置电流来调节 LD<sub>2</sub> 矩形波导的线性与非线性折射率系数, 使得由于注入激光场激发的矩形波导的场发生变化, 造成矩形波导对激光场的反射系数随加在其上的偏置电流的变化而变化, 由此将改变 LD<sub>2</sub> 矩形波导对两正交偏振态的反馈量, 相应地调整了环形腔内两正交偏振激光场的耦合强弱, 达到激光自脉冲的产生和控制的目的。

实验所用的掺铒光纤长度为 13 m, 数值孔径为 0.18, 芯径为 2.5 μm。光纤环中所用单模光纤的长度为 2 m。掺铒光纤激光器的阈值泵浦功率为 10 mW, 当泵浦功率处在 10~ 15 mW 之间, 激光器为连续工作状态。但当泵浦功率增加到 15 mW 时, 激光器连续工作状态变得很不稳定。泵浦功率为 16 mW 且不放置 LD<sub>2</sub> 时, 激光器输出光强呈现自脉冲行为, 但光脉冲序列中光强存在着起伏, 如图 2 所示。此时泵浦系数为 1.6 (泵浦系数定义为泵浦功率与阈值泵浦功率之比), 激光器由连续工作状态过渡到自脉冲工作状态。激光器的总光强应为腔内两正交偏振光场耦合的结果, 故可以通过光纤环中两正交偏振态的耦合强弱来控制激光自脉冲行为。为此, 可通过改变 LD<sub>2</sub> 上的偏置电流来调整光纤环形腔内两正交偏振光场耦合强弱, 以实现稳定的激光自脉冲输出。维持 LD<sub>1</sub> 的泵浦功率为 16 mW, 调节 LD<sub>2</sub> 的偏置电流至 5 mA, 微调光纤环中偏振控制器, 激光器输出稳定的光脉冲序列, 如图 3 所示, 此时的光脉冲具有相同光强。图 2 和图 3 中光脉冲的脉宽为 100 μs, 重复频率为 5 kHz。作者认为激光器的自脉冲行为获得了有效的控制。

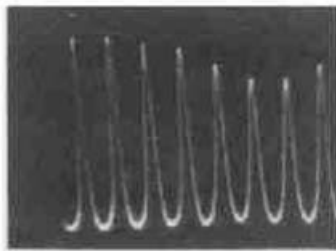


Fig. 2 The pulse train extracted from the Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser without the laser feedback induced by LD<sub>2</sub>. The pump power  $P_p = 16$  mW, and the single-mode fiber length  $l = 2$  m

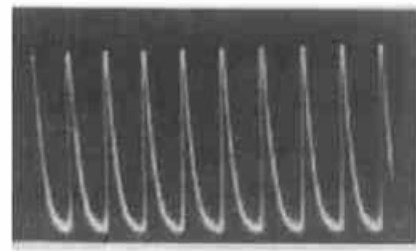


Fig. 3 The pulse train extracted from the Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser with the laser feedback induced by LD<sub>2</sub>. The bias current of LD<sub>2</sub> is 5 mA and the other parameters are same as Fig. 2

## 2 带反馈的光纤激光器理论模型

考虑掺铒光纤为三能级的原子系统, 假设其第三能级寿命较短, 兼顾激光产生及其传输介质的偏振特性。用麦克斯韦方程来描述激光场以及密度矩阵来描述原子系统, 并用旋波近似, 可得到如下的微分方程组<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -k(e - de - \sigma c), \quad \frac{\partial d}{\partial t} = -\gamma_d (de^2 + 2\sigma ec + d - \alpha), \quad \frac{\partial c}{\partial t} = -\gamma_c (c + de) \tag{1}$$

式中:  $e, d$  分别为激光场和反转粒子数;  $1/k, 1/\gamma_d$  分别为光子寿命和铒离子的亚稳态寿命。 $\gamma_c$  为与相干项  $c$  有关的弛豫常数,  $\sigma$  为与  $\gamma_c$  有关的系数,  $\alpha$  为泵浦参数。因光纤激光器中存在

两正交的偏振激光场, 环形光纤激光器中自脉冲的形成是由于 LD<sub>2</sub> 对该偏振激光场的反馈及它们相互叠加和转化的结果, 因此考虑到激光场的耦合及 LD<sub>2</sub> 对激光场的反馈, 有:

$$\begin{cases} \partial e_x / \partial \tau = -k[e_x - e_x(d_x + \beta d_y) - \sigma c_x - r_x e_x], \\ \partial d_x / \partial \tau = -\gamma_{\parallel} [d_x(e_x^2 + \beta e_y^2) + 2\sigma e_x c_x + d_x - \alpha], \\ \partial c_x / \partial \tau = -\gamma_c(c_x + d_x e_x), & \partial e_y / \partial \tau = -k[e_y - e_y(d_y + \beta d_x) - \sigma c_y - r_y e_y], \\ \partial d_y / \partial \tau = -\gamma_{\parallel} [d_y(e_y^2 + \beta e_x^2) + 2\sigma e_y c_y + d_y - \alpha], & \partial c_y / \partial \tau = -\gamma_c(c_y + d_y e_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\beta$  为两正交偏振激光场的耦合系数;  $d_x$ 、 $d_y$  为对应于两正交偏振方向的反转粒子数;  $r_x$ 、 $r_y$  为 LD<sub>2</sub> 对两正交偏振激光场的反馈系数。在数值计算中, 取  $\beta = 0.5$ , 表明在光纤的芯区激光场的两正交偏振态存在着较强的相互作用。要分析光纤激光器的工作稳定性是极其复杂的, 而且其稳定性强烈地依赖于各个弛豫常数的数值。

采用变步长 Runge-Kutta 方法, 对方程组 (2) 进行了数值计算。参数选择如下:  $\sigma = 0.05$ ,  $\beta = 0.5$ , 及  $\gamma_{\parallel} / k = 3 \times 10^{-4}$ , 并选取  $e_x$ 、 $e_y$ 、 $d_x$ 、 $d_y$ 、 $c_x$ 、 $c_y$  的稳态值作为计算的初始值。当激光器的泵浦参数为  $\alpha = 1.6$ , 且  $r_x$ 、 $r_y$  均为零 (LD<sub>2</sub> 对两正交偏振激光场无反馈) 时, 计算获得较稳定的光脉冲序列 (图 4)。但脉冲强度有起伏, 这与实验结果 (图 2) 相吻合。理论计算发现, 激光器的自脉冲特性与  $r_x$ 、 $r_y$  及  $\gamma_c / k$  的取值密切相关。图 5 示出 LD<sub>2</sub> 对两正交偏振激光场有反馈, 且  $r_x = 0.5$ 、 $r_y = 0.5$  时, 计算获得的光脉冲序列。此时输出等强度光脉冲, 与图 3 的实验结果吻合较好。当  $r_x = 0.8$ 、 $r_y = 0.75$  时, 数值计算获得图 6 所示激光器的瞬态特性。此时激光器由高频振荡逐渐演变为连续工作。随着  $\gamma_c / k$  的减小, 使激光器产生自脉冲的泵浦参数减小; 随着  $r_x$ 、 $r_y$  数值的增加, 激光器逐渐由脉冲工作状态演变为连续工作。因此, 控制两正交偏振光的反馈量大小, 对激光器脉冲工作状态具有显著的意义。

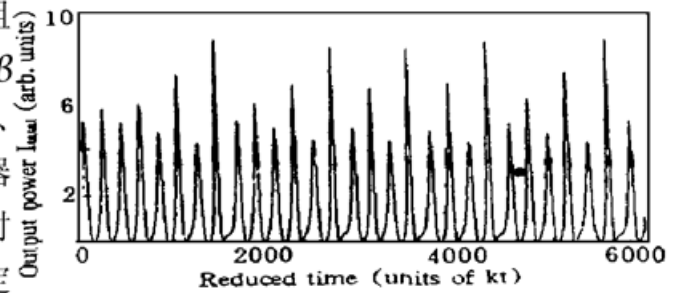


Fig. 4 Numerical simulation of the transient behaviors of the total intensity  $I_{\text{total}}$  of the coupled lasers coherently pumped, and with the following parameters:  $\alpha = 1.6$ ,  $\gamma_{\parallel} / k = 3 \cdot 10^{-4}$ ,  $\gamma_c / k = 0.05$ ,  $\sigma = 0.05$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $r_x = 0.0$ ,  $r_y = 0.0$

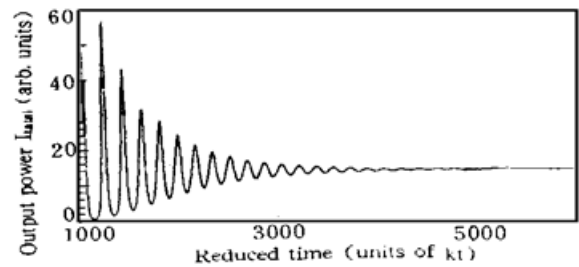
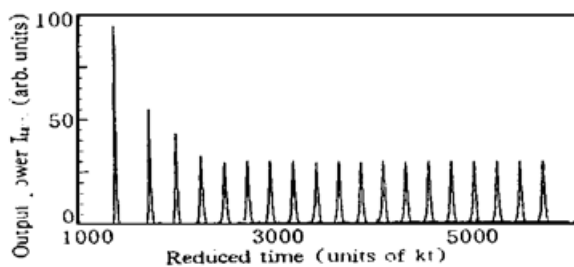


Fig. 5 Same as Fig. 4, but with  $r_x = 0.5$ ,  $r_y = 0.5$

Fig. 6 Same as Fig. 4, but with  $r_x = 0.8$ ,  $r_y = 0.5$

继续增加泵浦参数至 2.5, 且无反馈 ( $r_x = 0.0$ 、 $r_y = 0.0$ ) 时, 数值计算获得更有趣的结果, 如图 7 所示, 激光系统显示了更加复杂的非线性动力学行为, 有多个不同强度的光脉冲按各自的周期振荡着。如图 8 所示, 当  $r_x = 0.5$ 、 $r_y = 0.5$ , 且有反馈的情形下, 激光器系统的这种复杂行为获得了控制, 由于实验的泵浦参数条件的限制, 此理论结果目前还不能在实验中获得论证, 但作者正在提高泵浦用激光器的功率, 使实验中更加逼近该理论结果。

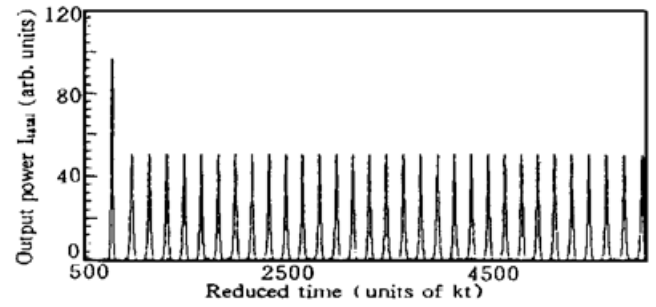
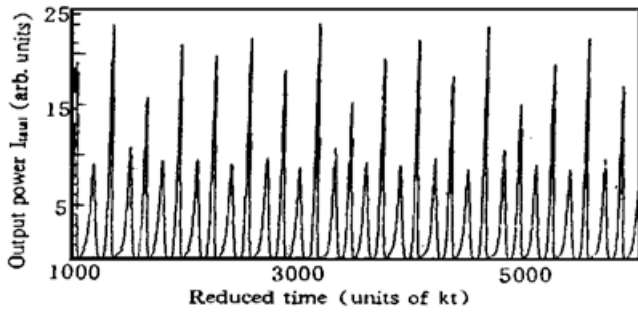


Fig. 7 Same as Fig. 4, but with a pump parameter  $\alpha = 2.5$  Fig. 8 Same as Fig. 7, but with  $r_x = 0.5$ ,  $r_y = 0.5$

**结 论** 本文在较低的泵浦功率 ( $\alpha = 1.6$ ) 下在掺铒光纤激光器中观察到了自脉冲, 并利用特殊半导体材料对激光场的两正交偏振态反馈, 抑制了自脉冲的强度起伏, 使光脉冲得到了控制。利用对两正交偏振态的反馈和两正交偏振态在光纤中耦合的理论模型, 解释了光纤激光器的自脉冲的产生及控制的物理机制。进一步的计算还表明, 该理论模型还能证明在光纤激光器中可产生象激光混沌等非线性动力学现象, 利用对激光场的反馈可以控制这些非线性动力学现象。因此, 本文的理论与实验结果对研究掺杂的光纤激光器中的非线性动力学现象的形成与控制具有重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] M. Le. Flohic, P. L. Francois, J. Y. Allain *et al.*, Dynamics of the transient buildup of emission in  $\text{Nd}^{3+}$ -doped fiber laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-27**(7): 1910~ 1920
- [2] B. Meziane, F. Sanchez, G. M. Stephan *et al.*, Feedback-induced polarization switching in a Nd-doped fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23): 1970~ 1972
- [3] R. Leners, P. L. Francois, G. M. Stephan, Simultaneous of effects of gain and loss anisotropies on the thresholds of a bipolarization fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(4): 275~ 277
- [4] S. Bielawski, D. Derozier, P. Glorieux, Antiphase dynamics and polarization effects in the Nd-doped fiber laser. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **46**(5): 2811~ 2822
- [5] E. Lacot, F. Stoeckel, M. Chenevier, Dynamics of an erbium-doped fiber laser. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **49**(5): 3997~ 4008

## Control of Self-Pulsation in $\text{Er}^{3+}$ -Doped Fiber Laser

Sun Junqiang      Huang Dexiu

*ment of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430*

(Received 1 May 1995; revised 23 October 1995)

**Abstract** The self-pulsation has been observed and controlled experimentally by means of optical feedback in  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser (EDFL). The mechanism of generation and control of self-pulsation are explained theoretically by the model of two coupled lasers with optical feedback. The results show that the feedback and couple the two orthogonal states of polarization are important for formation and control of optical pulses in EDFL.

**Key words**  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser, self-pulsation, control.