

# 全光纤激光器自启动锁模特性的理论研究

孙军强 刘雪峰 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

李再光

(华中理工大学激光技术国家实验室, 武汉 430074)

**摘 要** 分析了带非线性放大光纤环的全光纤激光器的自启动锁模特性, 得到了计算该激光器中光脉冲的有效能量增益的理论模型. 结果表明, 激光器的自启动锁模同掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤的增益及纤芯的有效截面积有关, 并计算了自启动锁模的阈值峰值功率大小. 应用本文的理论模型能成功地解释观察到的实验现象.

**关键词** 自启动锁模, 有效能量增益.

## 1 引 言

连续激光器的被动锁模已成为超短光脉冲产生的最为有效的手段. 通过插入耦合腔中单模光纤的非线性元件实现了对连续工作固体激光器的被动锁模——叠加光脉冲锁模 (APM)<sup>[1]</sup>. 在叠加光脉冲锁模激光器中, 锁模光脉冲的形成可理解为来自非线性外腔中的频率啁啾光脉冲同主腔中的光脉冲在耦合镜处相干叠加而形成, 最具代表性的是 Mollenauer 和 Stolen 的光孤子激光器<sup>[2]</sup>. 在色心激光器中应用此技术已能产生脉宽为 100 fs 的光脉冲<sup>[3]</sup>.

在某些特殊的激光介质中, 如掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤<sup>[4]</sup>、掺钛蓝宝石<sup>[5]</sup>等激光介质, 已实现了自启动锁模. 而在全光纤激光器中观察到了自启动锁模现象, 并获得了 320 fs 的超短光脉冲<sup>[6]</sup>. Haus<sup>[1]</sup> 等人通过对非线性元件的算子定义, 导出叠加光脉冲锁模的动力学方程, 不但相当复杂, 并且只能求得稳定解, 不能解释自启动锁模形成机理. 本文针对有非线性放大环形镜的全光纤激光器, 讨论了其自启动锁模的形成机理.

## 2 理 论

Duling 等人<sup>[4]</sup>所例的是典型的全光纤自启动被动锁模激光器, 其锁模机理主要是同非线性放大的环形镜有关. 如图 1 所示, 与其相对应的等效光路如图 2 所示. 设光纤耦合器的耦合系数为  $\alpha$ , 则其变换矩阵为:

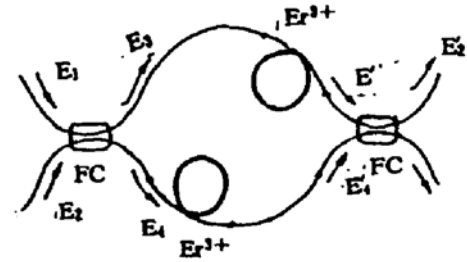
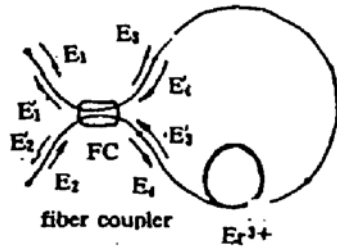


Fig. 1 The nonlinear amplifying fiber loop. FC: fiber coupler

Fig. 2 The equivalent optical path of Fig. 1

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ E_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & i(1-\alpha)^{1/2} \\ i(1-\alpha)^{1/2} & \alpha^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1^{1/2} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & G_2^{1/2} e^{i\phi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & i(1-\alpha)^{1/2} \\ i(1-\alpha)^{1/2} & \alpha^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$G_1$ 、 $G_2$  为在非线性放大的光纤环中放大器对两方向传输的光的增益； $\phi_1$ 、 $\phi_2$  为相向而行的光在非线性放大环中传输一周的相位。假设“2”端无激光注入，则有：

$$\phi_1 = 2\pi n_2 \alpha |E_1|^2 L / \lambda A_{eff}, \quad \phi_2 = 2\pi n_2 (1-\alpha) G_2 |E_1|^2 L / \lambda A_{eff} \quad (2)$$

$$G_1 = G(\alpha |E_1|^2), \quad G_2 = G[(1-\alpha) |E_1|^2] \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为耦合器的耦合系数； $n_2$  为光纤的非线性折射率系数； $E_1$  为注入端激光场幅值， $L$  为光纤长度， $\lambda$  为激光波长； $A_{eff}$  为有效芯截面积。经过对(1)式作数值计算，有：

$$|E_2|^2 = [\alpha^2 G_1 + (1-\alpha)^2 G_2 - 2\alpha(1-\alpha) G_1^{1/2} G_2^{1/2} \cos(\phi_2 - \phi_1)] |E_1|^2 \quad (4)$$

非线性放大环的透过率为：

$$t = \alpha^2 G_1 + (1-\alpha)^2 G_2 - 2\alpha(1-\alpha) G_1^{1/2} G_2^{1/2} \cos(\phi_2 - \phi_1) \quad (5)$$

假设在连续波的背景上有一个微弱的光脉冲，设为  $E_1$ ，则对  $E_1$  的有效能量增益为

$$G_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t |E_1|^2 d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_1|^2 d\tau} \quad (6)$$

当  $G_{eff} > 1$  时，由微弱光脉冲  $E_1$  经非线性放大的光纤环后，可不断地获得增加，这样，可使连续工作的激光器向脉冲激光器过渡，在条件选择合适时，即将产生自启动锁模。但在  $G_{eff} \leq 1$  时，微弱的光脉冲不能持续地增长，不能达到自启动锁模，因此， $G_{eff}$  是否大于 1，是激光器自启动锁模的阈值的条件。当考虑放大器的增益饱和时，可得光纤放大器的瞬态增益，有：

$$G(\tau) = \left\{ 1 - (1 - 1/G_0) \exp \left[ (-1/E_s) \int_{-\infty}^{\tau} |E_{in}|^2 d\tau' \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

$G_0$  为光纤放大器的小信号增益，因而，

$$G_1(\tau) = \left[ 1 - (1 - 1/G_0) \exp \left( -\frac{\alpha}{E_s} \int_{-\infty}^{\tau} |E_1|^2 d\tau' \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

$$G_2(\tau) = \left\{ 1 - (1 - 1/G_0) \exp \left[ -\frac{(1-\alpha)}{E_s} \int_{-\infty}^{\tau} |E_1|^2 d\tau' \right] \right\}^{-1} \quad (9)$$

联立(1)~(9)式，可计算  $G_{eff}$  值的大小，从而获得光纤激光器的自启动锁模条件。

### 3 数值计算

激光器中由于噪声或跳模现象的存在，必定存在着微弱光脉冲叠加在连续波背景上。假

设起初从耦合器“1”端注入到非线性放大的环形镜中的微弱脉冲具有高斯光脉冲形状，即：

$$E = E_0 \exp(-\tau^2/2) \tag{10}$$

在计算中，对光脉冲能量进行无量纲变换， $|E|^2 = |E_1|^2 |E'|^2$ ，其中  $|E'|^2 = \lambda A_{eff}/2\pi n_2 L$ ，如图 3 所示，在不同峰值功率下，有效能量增益同掺  $Er^{3+}$  光纤放大器增益  $G$  的关系。在  $|E_1|^2$  数值较小时，而放大器具有较高的增益，才能使微弱光脉冲扰动拥有有效的能量增益，即  $G_{eff} > 1$ ，而当  $|E_1|^2$  数值较大时，仅需放大器拥有较低的增益，就可满足  $G_{eff} > 1$ ，一般，起始的微弱光脉冲峰值较弱，所以，要在全光纤激光器中，需用较大的泵浦功率产生较大的增益，才能使光纤激光器形成自启锁模。一旦自启动锁模形成，此时降低泵浦功率，即减小光纤放大器的增益，由于此刻光脉冲的峰值功率较大，仅需小的增益，就可获得相同的有效能量增益。在图 3 中，激光器的工作点有可能从 A 点突变到 B 点，仍然能够实现稳定的锁模光脉冲序列输出。这同已有的实验<sup>[4]</sup>一致。

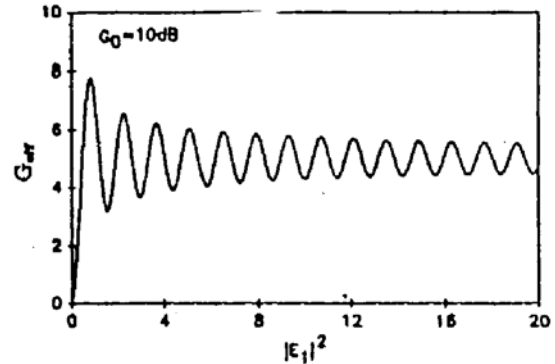
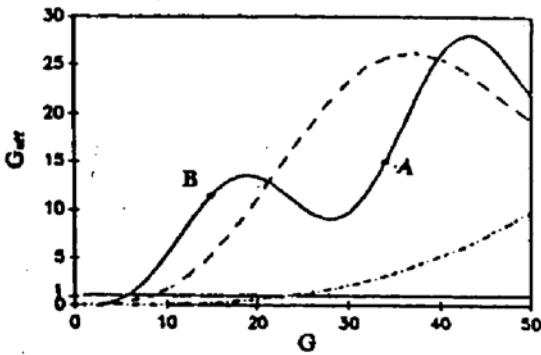


Fig. 3 The effective energy gain  $G_{eff}$  off the laser as a function of  $Er^{3+}$ -doped fiber gain with  $|E_1|^2 = 0$ . 5 (solid curve);  $|E_1|^2 = 0.25$  (dashed curve) and  $|E_1|^2 = 0.05$  (dashed-dotted curve)

Fig. 4 The effective energy gain  $G_{eff}$  as a function of pulse peak power for the given  $Er^{3+}$ -doped fiber gain

如图 4 所示，当掺  $Er^{3+}$  光纤放大器的能量增益为 10 dB，有效能量增益  $G_{eff}$  同微弱光脉冲峰值功率的关系。从图中可以看到，有效能量增益  $G_{eff}$  随光脉冲的峰值功率变化呈周期性变化，且这种周期性的振荡随峰值功率的增加呈衰减趋势，表明开始时光脉冲的自启动比高峰值时的自启动锁模容易，但稳定性较差，峰值功率较大时实现的自启动锁模稳定性较好。设  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ， $A_{eff} = 50 \text{ }\mu\text{m}^2$ ，激光波长为  $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$ ，取非线性放大光纤环中单模光纤长度为 10 m，当掺铒光纤放大器的小信号增益为 40 dB，通过计算可知，实现自启动锁模的光纤中微弱光脉冲的阈值峰值功率仅为 200  $\mu\text{W}$ 。

假设光纤放大器有饱和现象存在，且饱和能量有如下关系：

$$E_s = \hbar \omega A_{eff} / 2\sigma \tag{11}$$

式中， $\sigma$  为受激散射截面； $\hbar\omega$  为单个光子的能量。如图 5 所示，是在微弱光脉冲峰值功率不变的情况下，在不同的  $A_{eff}$  下，有效能量增益  $G_{eff}$  同放大器小信号增益的关系。发现在不同的有效芯截面  $A_{eff}$  下，自启动锁模的难易程度。可以看到，有效截面积  $A_{eff}$  越小，则激光器的自启动锁模越容易实现。在有饱和存在的条件下，并给定了光纤放大器的小信号增益  $G_0$ ，有效能量增益同微弱光脉冲峰值功率的关系，如图 6 所示，与不考虑掺铒光纤的增益饱和相比，变化趋势较缓慢，此刻由自启动而达到激光器的锁模状态较稳定。

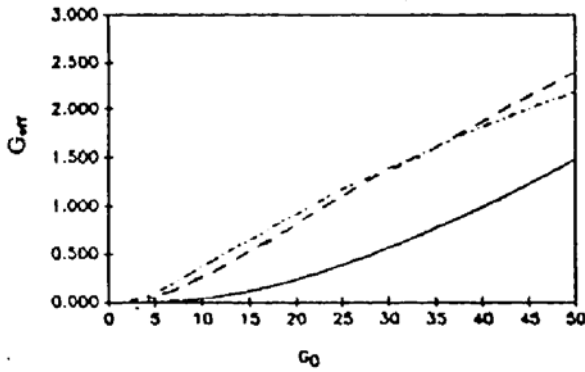


Fig. 5 The effective gain  $G_{eff}$  as a function of  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber gain with  $A_{eff} = 50 \mu\text{m}^2$  (dashed curve);  $A_{eff} = 250 \mu\text{m}^2$  (solid curve) and  $A_{eff} = 25 \mu\text{m}^2$  (dashed-dotted curve) for the given pulse peak power

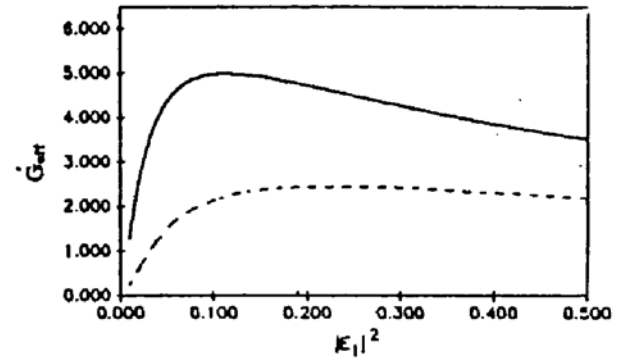


Fig. 6 The effective energy gain  $G_{eff}$  as a function of the pulse peak power with the given  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber gain  $G_0 = 50$  (dashed curve) and  $G_0 = 100$  (solid curve) by considering the gain saturation

### 参 考 文 献

- [1] E. P. Ippen, H. A. Haus, L. Y. Liu, Additive pulse mode locking. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(9): 1736~1745
- [2] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, The soliton laser. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(1): 13~15
- [3] X. Zhu, P. N. Kean, W. Sibbett, Coupled-cavity mode locking of a KCl:Ti laser using an erbium-doped optical fiber. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(21): 1192~1194
- [4] Irl N. Duling III, All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 539~541
- [5] J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fujimoto *et al.*, Femtosecond passively mode-locked Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser with a nonlinear external cavity. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20): 1125~1127
- [6] D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne *et al.*, 320 fs soliton generation with passively mode-locked erbium-fiber laser. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(9): 730~732

## Theoretical Analysis of Self-Starting Mode-Locking Characteristics of All Fiber Lasers

Sun Junqiang      Liu Xuefeng      Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 1993; revised 1993)

**Abstract** In this paper, the self-starting mode-locking characteristics of all fiber lasers with nonlinear amplifying fiber loop are analyzed and the theoretical model of calculating the pulse effective energy gain in the lasers is obtained. The results show that the self-starting mode-locking of the lasers are related to the gain and cross-section of the  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber. The threshold peak powers of the pulses for self-starting mode-locking are calculated. With this model, the experimental phenomena are well explained.

**Key words** self-starting mode-locking, effective energy gain.