

# 频移反馈 Nd:YLF 激光软阈值实验 与模拟计算

梁桂云

(长春光学精密机械学院基础科学系, 130022)

王瑞丽

(云南师范大学物理系, 昆明 650092)

M. W. Phillips J. R. M. Barr

(南安普顿大学光电子研究中心,)

**摘 要** 实验和模拟计算均表明: 在无注入种子激光的频移反馈 Nd:YLF 激光系统中, 不存在软阈值, 而当注入种子激光时, 出现软阈值特性, 实验还发现: 随着种子激光功率增大, 软阈值变得更加明显。

**关键词** 软阈值, 频移反馈。

## 1 引 言

用声光调制器(AOM)作频移元件, 构成频移反馈(FSF)激光系统, 获得连续无模激光频谱<sup>[1, 2]</sup>, 它可以用在光放大、原子冷却及光谱学等领域<sup>[3, 4]</sup>。

将单频激光注入进频移反馈激光系统中, 注入的种子激光波长必须调到距激光系统增益介质的增益曲线中心的合适位置上, 便可以获得频率梳<sup>[5]</sup>, 其各频率分量和间距取决于声光调制器的调制频率。种子激光的强度必须略大于自发辐射的噪声。

作者曾用频移反馈 Nd:YLF 激光系统, 分别在无注入种子激光和注入种子激光两种条件下, 进行了实验, 产生了宽带频率梳, 获得了超短脉冲。并观察了它的驱动弛豫振荡特性及光谱特性<sup>[6]</sup>。由于频移反馈激光系统不同于传统激光器, 其频移反馈的结果不仅产生了非共振宽带频谱。而且也显示了传统激光器所没有的许多新特性。人们曾对染料增益介质的频移反馈系统进行模拟计算, 得出了它的软阈值特性<sup>[7]</sup>。本文将对长达 430  $\mu\text{s}$  荧光寿命的 Nd:YLF 增益介质的频移反馈激光系统, 在注入和不注入种子激光的情况下, 进行了实验与模拟计算, 获得了它的软阈值特性。获得了理论与实验完全一致的满意结果。

### 2 实 验

实验装置如图 1 所示。增益介质是一个一端为平面，一端为布儒斯特角的 Nd:YLF 棒，棒的直径和长度分别为 5 mm 和 7 mm。激光波长为 1047 nm。用掺 Ti 的兰宝石可调谐激光泵浦。泵浦波长为 800 nm。激光棒平端 M<sub>1</sub> 有一个对泵浦光 90% 透过率、对激光波长为高反射率的介质膜层。M<sub>2</sub> 和 M<sub>4</sub> 均对激光全反射。M<sub>2</sub> 为半径 15 cm 的凹面镜。平面反射镜 M<sub>3</sub> 对激光波长穿透率为 5%。种子激光由此注入。声光调制器是一个 Q 开关元件，实验取调制频率为 80 MHz，以布儒斯特角方向放置。频移由低频向高频方向。M<sub>4</sub> 的曲率半径为 50 cm，它将经过调制器的一级衍射光反射回调制器。调制器的衍射效率为 55%。调制器功率为 1.7 W。激光腔长为 1.875 m。

种子激光为 Nd:YLF 单频激光器。波长为 1047 nm。它可以相对于频移反馈激光中心频率调谐几十个千兆赫范围。将 1 mm 厚精细度为 20 的法布里-珀罗标准具插入频移反馈激光腔中，限制后的激光带宽为 1.5 GHz，成功地获得频率梳。

为了得到阈值附近特性，用 x-y 函数记录仪，在低泵浦功率下，对注入不同种子激光功率和不注入种子激光情况下，分别获得输出功率随泵浦功率变化曲线。图 2 中五条曲线分别表示注入种子激光功率在腔内为 750 μW、400 μW、85 μW、30 μW 及无注入种子激光情况下的软阈值特性。可以看出在有种子激光注入的情况下，的确存在软阈值。尽管曲线上有许多由于激光功率起伏而造成的小尖峰存在，但在曲线的下部仍能分并出，注入种子激光功率越大，软阈值特性越明显。

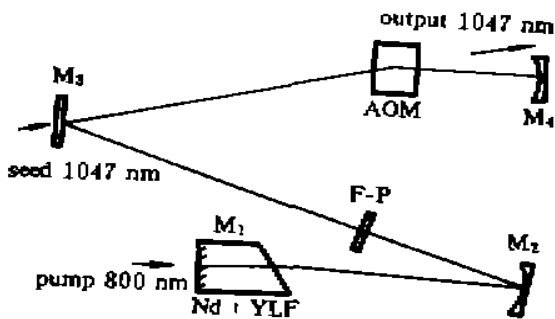


Fig. 1 Experimental schematic of the frequency shifted feedback (FSF) Nd:YLF laser

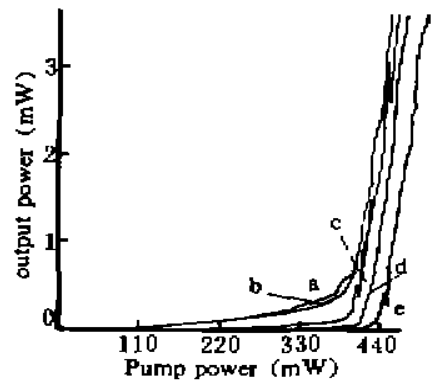


Fig. 2 Experiment curves of soft threshold. Seeding power: (a) 750 μW, (b) 400 μW, (c) 85 μW, (d) 30 μW, (e) 0 μW

### 3 模拟计算方程

用一组速率方程来描写注入种子激光的频移反馈激光系统。腔内激光频率为第 q 分量 (q 为整数) 的光子数 M<sub>q</sub> 随时间 t 的变化由下式决定：

$$\frac{d M_q}{dt} = - \gamma_{car}^q M_q + B N M_q + (\eta^2 M_{q-1} - M_q) / \tau_c + B N \tau_c \Delta \nu + \delta_{sp} T_{sp} P_{sp} / \hbar \omega_l \tag{1}$$

(1) 式右端第一项表示频率为 q 分量的腔内损耗，损耗系数为：

$$\gamma_{car}^q = - \frac{\ln R}{\tau_c} + \frac{1 - \exp [ - (g - g_0)^2 / G ]}{\tau_c} \tag{2}$$

R = 0.90 是镜面反射率，τ<sub>c</sub> = 6.25 × 10<sup>-9</sup> s 是光往返腔长所用的时间，激光增益带宽和腔内

法布里-珀罗标准具的影响采用光谱中心在  $g_0$ ，宽度为  $G$  的高斯线形描述。 $G = 9.92 \text{ GHz}$ ， $g_0 = 4.81 \text{ GHz}$ 。为计算方便，频率  $g$  取  $g = 0.16 q$ ，因为光在腔内往返一次的频移量是  $0.16 \text{ GHz}$ 。

(1)式右端第二项表示反转粒子数  $N$ 、光子数  $M_q$  由于受激辐射的影响。 $B$  为光场与反转粒子数之间的耦合系数。它正比于爱因斯坦系数。 $B$  的值是这样选择的，即计算出的激光阈值大约为  $50 \text{ mW}$ 。取  $B$  为  $2.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。(1)式右端第三项描述声光调制器对频移的影响。 $\eta = 0.55$  是调制器的单程衍射效率。第四项表示由于自发辐射进入到每一频率分量的光子<sup>[8]</sup>。 $\Delta\nu_q$  是光往返一次的频移量。第五项为注入种子激光的影响。 $T_{m_3}$  为  $M_3$  对种子激光的透过率其值为  $0.05$ 。 $\delta_{\omega_q}$  是狄拉克(Dirac)Delta 函数。 $P_{m_3}$  是腔外注入种子激光功率。 $\omega_L$  为注入单频种子激光频率。反转粒子数  $N$  随时间  $t$  的变化由下式给出：

$$\frac{dN}{dt} = \frac{P}{h \omega_p} - BN \sum_q M_q - \frac{N}{\tau_f} \tag{3}$$

(3)式右端第一项是泵浦速率。 $P$  为泵浦功率。 $\omega_p$  为泵浦光频率。(3)式右端后两项分别表示受激辐射与自发辐射对反转粒子数的影响。 $\tau_f$  为荧光寿命， $\tau_f = 430 \mu\text{s}$ 。

激光输出功率为  $P_{out}$ ，

$$P_{out} = \frac{(1 - \eta)}{\tau_r} h \omega_L \sum_q M_q \tag{4}$$

输出光沿声光调制器零级衍射方向。

用计算机求解上述几个方程。计算步长为  $0.5 \tau_r$ 。计算时间以系统达到稳态为准。

### 4 模拟计算结果

计算采用的种子激光功率为  $0.5 \text{ mW}$ ，在腔内的功率为  $25 \mu\text{W}$ 。种子激光频率比激光增益曲线中心低  $3.52 \text{ GHz}$  处，频移向高频方向。可以看出，这是一条很好直线。但将阈值附近放大，可以明显看出它的软阈值特性。如图 4 所示。

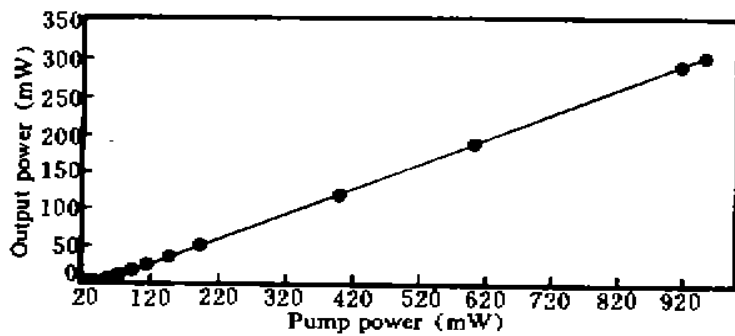


Fig. 3 Power characteristic of the FSF laser with injection-seeding

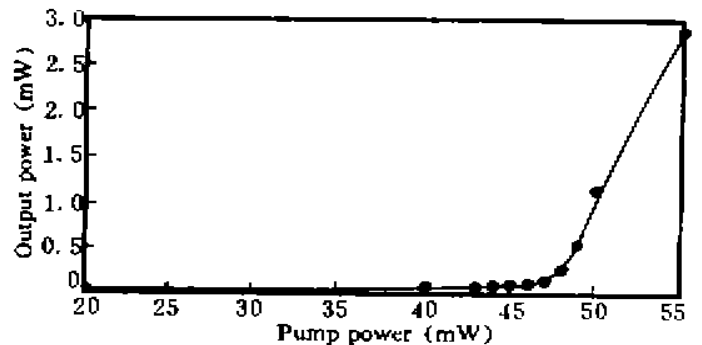


Fig. 4 model calculation curve of soft threshold

图 5 给出不注入种子激光和注入种子激光两种情况下阈值特性曲线。可以看出，无种子激光注入时，不存在软阈值特性。它与实验结果完全一致。

**结 论** 在 Nd:YLF 频移反馈激光系统中, 腔内插入一个法布里-珀罗标准具, 当没有种子激光注入时, 实验没有发现软阈值特性。当注入不同功率的种子激光时, 均得到了软阈值特性曲线。并且, 注入的种子功率越高, 软阈值特性越明显。

采用速率方程对上述实验系统进行模拟计算, 结果表明, 没有种子激光注入时, 确实没有软阈值存在。而当种子激光注入时, 明显表现了软阈值特性。这证明, 理论计算与实验结果是完全一致的。

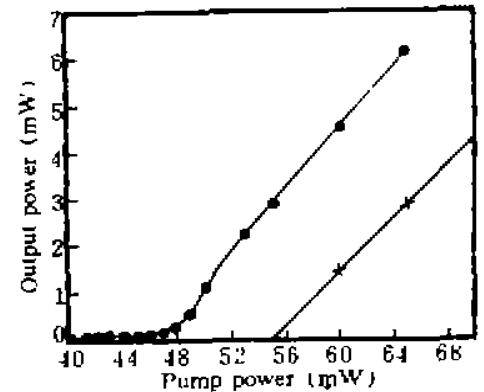


Fig. 5 Comparison of threshold behaviour curves (a) with injection-seeding, (b) without injection-seeding

### 参 考 文 献

- [1] I. C. M. Littler, S. Balle, K. Bergmann, Continuous wave laser without frequency domain structure; investigation of emission properties and build up dynamics. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, 8(7): 1412~1420
- [2] P. I. Richter, T. W. Hansch, Diode laser in external cavities with frequency shifted feedback. *Opt. Commun.*, 1991, 85(5,6): 414~418
- [3] J. Hoffnagel, Proposal for continuous white light cooling of an atomic beam. *Opt. Lett.*, 1988, 13(2): 102~104
- [4] I. C. M. Littler, K. Bergmann, Regenerative amplification of a weak CW optical signal in an active frequency shifted feedback cavity. *Opt. Commun.*, 1992, 87(1, 2): 53~60
- [5] I. C. M. Littler, K. Bergmann, Generation of multi-frequency laser emission using an active frequency shifted feedback cavity. *Opt. Commun.*, 1992, 88(4,5,6): 523~530
- [6] M. W. Phillips, G. Y. Liang, J. R. M. Barr, Frequency comb generation and pulsed operation in a Nd:YLF laser with frequency shifted feedback. *Opt. Commun.*, 1993, 100(5, 6): 473~478
- [7] I. C. M. Littler, Jürgen H. Eschner, The CW modeless laser; model calculation of an active frequency shifted feedback cavity. *Opt. Commun.*, 1992, 87(1, 2): 44~52

## Experiments and Model Calculation of Soft Threshold for the Frequency Shifted Feedback Nd:YLF Laser

Liang Guiyun

(Department of Basic Science, Changchun College of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Wang Ruili

(Department of Physics, Yunnan Normal University, Kunming 650092)

M. W. Phillips J. R. M. Barr

(Optoelectronics Research Centre, University of Southampton)

(Received 20 December 1994; revised 27 March 1995)

**Abstract** Experiments and model calculation show that no soft threshold presented in a frequency shifted feedback Nd:YLF laser, while the system with injection-seeding will possess a soft threshold. It was found experimently that this behaviour becomes apparent with increasing the power of injection-seeding.

**Key words** soft threshold, frequency shifted feedback.