

# 磷酸盐玻璃激光器中的自锁模现象

张国轩 黄国松 陈泽兴 林福成  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文报道了磷酸盐玻璃激光器中的自锁模现象。当泵浦功率密度较高,腔长较长时,自锁模的几率可达100%。对实验结果进行了分析和讨论。

关键词: 自锁模; 频率牵引。

## 一、引 言

早在六十年代 Crowell<sup>[1]</sup>就报道过 He-Ne 激光器中的自锁模现象,后来人们还在 CO<sub>2</sub>, Cu 蒸气、红宝石及 Nd:YAG 等激光器中观察到自锁模<sup>[2~5]</sup>。一般自锁模的重复性和稳定性都较差,所以实用的锁模器件一般都不采用自锁模的方法实现锁模。但是,通过对自锁模现象的了解有利于我们对激光与物质相互作用时出现的一些实验现象的理解。另外,一般的被动锁模激光器的稳定性还不够理想,分析表明被动锁模激光器的稳定性与初始条件关系密切,所以如果在被动锁模激光器中适当利用自锁模现象,有可能提高被动锁模激光器的稳定性。

## 二、实验装置及结果

实验中采用  $\phi 6 \times 100$  的磷酸盐玻璃棒,浓度为 3.5%,单灯泵浦,椭圆聚光腔,谐振腔为平面平行腔,端反射镜为全反射,输出镜反射率约为 54%,器件重复频率为每秒一次。输出激光波形由 PIN 管接收后在 300 MHz 的存储示波器上进行观察。

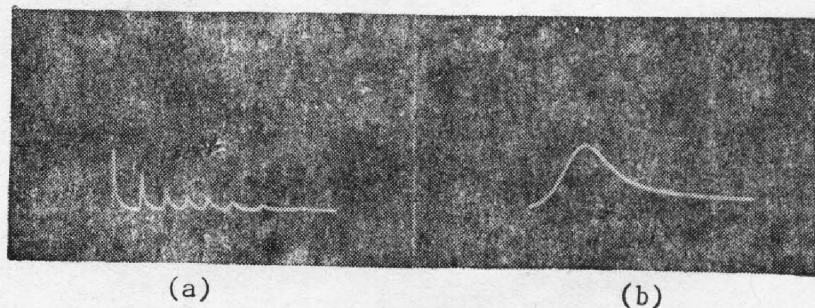


Fig. 1

(a) Free oscillation waveform of a phosphate glass laser (20  $\mu$ s/div)

(b) Time evolution of the first spike (200 ns/div)

众所周知, 钕玻璃激光器的自由振荡波形由许多无规尖峰组成。在一定的泵浦条件下和腔长较长时, 激光尖峰数目可以减少, 而且第一个尖峰的峰值功率最大, 其后的尖峰幅度衰减很快, 如图 1(a), 这时容易观察到自锁现象。除了第一个尖峰以外, 实验中也观察到后面几个尖峰的自锁模。为方便起见, 我们只观察第一个尖峰的自锁模。图 1(b) 为第一个尖峰的波形。实验中观察到下面一些结果:

1. 当泵浦功率密度为  $70 \text{ J/cm}^2$ , 腔长为  $0.9 \text{ m}$  时, 自锁模的几率很小, 随着腔长的增加, 锁模几率和最大调制深度也随之增加。当腔长小于  $1.5 \text{ m}$  时, 如泵浦功率较低, 则不易观察到自锁模现象, 随着泵浦功率的提高, 锁模几率和最大调制深度也增加, 实验中所用的最大泵浦功率密度为  $100 \text{ J/cm}^2$ 。

图 2(a)、(b)、(c) 分别是腔长等于  $5.5 \text{ m}$ 、 $3 \text{ m}$ 、 $1.5 \text{ m}$  时自锁模输出的示波器图形, 图中左面为激光输出第一个尖峰的锁模波形, 右面为时间展开的锁模波形。当腔长为  $5.5 \text{ m}$ , 泵浦能量为  $100 \text{ J/cm}^2$  时, 自锁模几率为  $100\%$ 。由图可见三种腔长的最大调制深度约分别不小于  $80\%$ ,  $70\%$  和  $40\%$ 。锁模脉冲间隔为  $2L/c$ ,  $c$  为光速,  $L$  为腔长。锁模脉冲宽度小于  $8 \text{ ns}$ 。

当腔长为  $5.5 \text{ m}$  时, 在阈值附近也能观察到自锁现象, 但自锁效果较差, 这时的泵浦能量为  $44 \text{ J/cm}^2$ 。

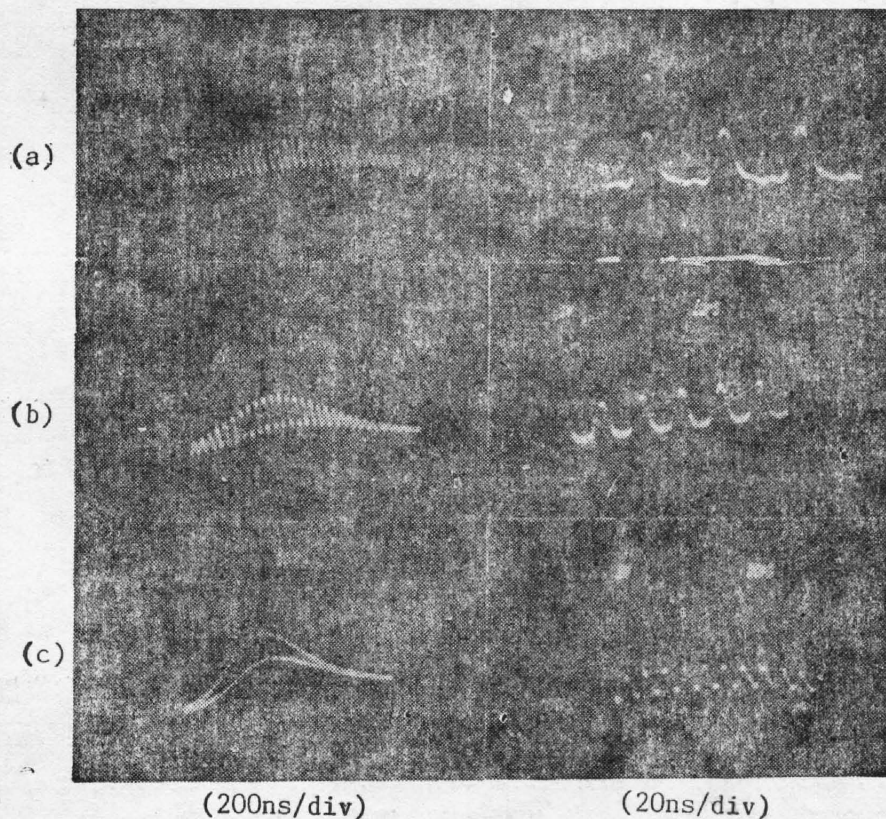


Fig. 2 Waveform of self-mode-locking laser from a phosphate glass laser. Cavity length  $L$  is  $5.5$  meters (a),  $3$  meters (b),  $1.5$  meters (c) respectively

2. 当钽玻璃棒紧靠输出镜时, 自锁模效果比较好, 随着棒的位置远离输出镜直至二分之一腔长处时, 锁模几率和调制深度均逐渐变小。

3. 当采用一根  $\phi 6 \times 100$  mm 的硅酸盐玻璃棒在上述条件下进行实验时, 未观察到自锁模现象。输出镜的反射率改为  $R=65\%$  和  $R=85\%$  时, 也未观察到自锁模现象。

4. 为了比较, 我们还观察了 Nd:YAG 的自锁模现象。实验表明, Nd:YAG 激光器比磷玻璃激光器较易出现自锁。采用  $\phi 6 \times 80$  的 Nd:YAG 棒, 当腔内加  $\phi 1$  mm 小孔, 阈值附近工作, 并使 Nd:YAG 棒靠近输出端镜时, 自锁模效果较好, 较易得到 100% 的锁模几率。图 3(a) 为 Nd:YAG 的自由振荡波形, 图 3(b)、(c) 为腔长等于 3 m 时的 Nd:YAG 激光器输出的自锁模波形, 最大调制深度不小于 85%。

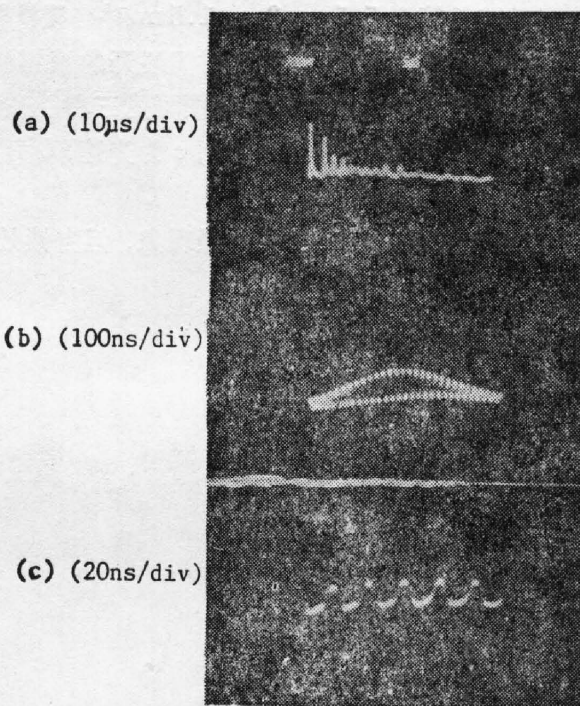


Fig. 3 Laser waveform from a Nd:YAG laser.

(a) Time evolution of free oscillation. (b), (c) Waveform of self-mode-locking laser out when cavity length  $L$  is 3 meters

### 三、分析和讨论

在有源腔中, 由于介质的色散和谱线加宽等, 将引起振荡频率偏离正常位置, 使模的频率间隔不相等。为了实现模式锁定要求对振荡模进行牵引或推移, 使纵模间隔严格相等。多模激光器中, 在某种条件下激活介质的非线性效应可使振荡模之间保持固定的相位关系, 各纵模之间有严格相等的频率间隔, 从而实现自锁模。

H. Statz<sup>[6]</sup> 曾由此导出实现自锁模的判据。设  $\delta\omega_k$  为介质色散等因素引起的纵模频移,  $\delta\omega_p$  为介质的非线性极化引起的频率牵引。当  $\delta\omega_p$  比  $\delta\omega_k$  小很多时, 自锁模不能实现, 只有当  $\delta\omega_p$  与  $\delta\omega_k$  为同一量级时才能实现自锁。

考虑三模振荡及工作在阈值附近时,

$$\delta\omega_p = \frac{\omega_0}{2} \left| \frac{\rho_0}{E_0} \right|, \quad (1)$$

其中  $\rho_0$  为频率为  $\omega_0$  的非线性极化分量,  $E_0$  为相应的电场

$$\rho_0(z) = \chi(0112) E_1^2(z) E_2^*(z). \quad (2)$$

其中  $\chi(0112)$  为非线性极化率,  $E_1, E_2$  为频率为  $\omega_1, \omega_2$  的模的电场,  $z$  为腔轴方向坐标。

表 1 列出了三模振荡时两种固体激光器的频率牵引和频率移动的值。

Table 1 The frequency pulling  $\delta\omega_p$  and the frequency shift  $\delta\omega_k$  for Nd-doped glass and YAG

Material	$\lambda(\mu)$	Cavity loss $\gamma(\text{sec}^{-1})$	$\delta\omega_p/2(\text{sec}^{-1})$	$ \delta\omega_k/2(\text{sec}^{-1}) $
Silicate glass	1.06	$10^8$	$1.8 \times 10^3$	$5 \times 10^5$
Nd:YAG	1.06	$10^8$	$2 \times 10^3$	$1 \times 10^8$

从上表可见, 虽然钕玻璃和 Nd:YAG 的频率牵引数量级相同, 但是由于钕玻璃色散和非均匀加宽引起的频移比 Nd:YAG 大得多。所以 Nd:YAG 较钕玻璃容易观察到自锁模。

实际上, 固体激光器多模工作时有大量的模同时振荡, 所以实际的频率牵引要比上面的估计要大得多。

同时, 由 [6] 推导可看出, 非线性极化产生的频率牵引  $\delta\omega_p$  和反转粒子数  $(n_2 - n_1)$ 、腔内光场、上能级寿命  $T_1$  及荧光线宽有关。从表 2 可看到, 磷酸盐玻璃的线宽比硅酸盐玻璃略小, 而受激发射截面却比硅酸盐玻璃大得多, 所以其非线性极化产生的频率牵引比硅玻璃大, 因而在高光泵的情况下, 增益较高, 腔内光场较强时, 磷酸盐玻璃激光器中也可以观察到自锁模现象。

Table 2 The parameters of phosphate and silicate glasses.

Material	Fluorescent linewidth ( $\text{\AA}$ )	Cross section for stimulated emission ( $\text{cm}^2$ )	Spontaneous lifetime ( $\mu\text{s}$ )
Phosphate glass	230	$4.25 \times 10^{-20}$	300
Silicate glass	270	$1.3 \times 10^{-20}$	580

自锁模现象与激活介质在腔内的位置有关, 文献 [7] 中已有详述, 分析表明, 激活介质在腔内离端镜小于腔长的三分之一时, 自锁模效果较好。

实验中观察到腔长较长时自锁模的几率及最大调制深度也随之增加, 这是显而易见的, 由于腔长变长时, 横模数减少而纵模数增加。

#### 四、结 束 语

当腔长较长, 光泵功率足够高时, 我们观察到磷酸盐玻璃激光器中的自锁模现象, 实验中还发现, 自锁模产生时, 一般情况下不易损坏的多层介质膜容易被激光损坏, 说明这时激光脉冲的峰值功率还是比较高的。

## 参 考 文 献

- [1] M. H. Crowell; *IEEE J. Q. E.*, 1965, QE-1, No. 1 (Apr), 12.
- [2] E. Walf; *«Progress in Optics»*, (North-Holland Publishing Company), Vol. IX (1971), 179.
- [3] 私人通信。
- [4] 李世芳等; *«光学学报»*, 1986, 6, No. 7 (Jul), 585.
- [5] G. J. Linford *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, 13, No. 6 (Jun), 1378.
- [6] H. Statz; *J. Appl. Phys.*, 1967, 38, No. 12 (Dec), 4648.
- [7] H. Statz *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1967, 38, No. 5 (May), 2212.

**Self-mode-locking in phosphate glass laser**

ZHANG GUOXUAN, HUANG GUOSONG, CHEN ZEXING AND LIN FUOHENG  
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 28 March 1988; revised 10 September 1988)

**Abstract**

The phenomenon of self-mode-locking in phosphate glass laser is reported. The experiment results have shown that the probability of self-mode-locking can reach 100% when the pumping power is high enough and the length of the resonator is longer. The experimental results have been analyzed and discussed in this paper.

**Key words:** self-locking of modes; frequency pulling.