

# 低功率泵浦三镜腔结构的 Cr : LiSAF 激光器各种运转特性的研究

王加贤\* 梁宏业 戴建明 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

**提要** 报道了采用三镜腔结构的 Cr : LiSAF 激光器在低功率的氩离子单谱线激光泵浦下, 连续光、自调  $Q$ 、自锁模和自调  $Q$ -自锁模的运转特性。当泵浦功率为 860 mW 时, 在腔内不加任何调制器和可饱和吸收体, 可实现自锁模运转, 得到重复频率为 150 MHz, 脉冲宽度为 51 fs, 输出功率为 48 mW 的脉冲序列。

**关键词** Cr : LiSAF 晶体, 连续光, 自调  $Q$ , 自锁模

## 1 引 言

掺铬氟化锂锶铝( $\text{Cr}^{3+} : \text{LiSrAlF}_6$ , 简称为 Cr : LiSAF) 是继掺钛蓝宝石之后又出现的一种新型可调谐固体激光材料。其主要特点是: 激光上能级寿命长(67  $\mu\text{s}$ ), 这就有利于反转粒子数的提高和能量的贮存; 对蓝绿光和红光波段都有吸收, 所以可采用包括氙灯、氪灯、氩离子激光器和半导体激光器在内的多种泵浦光源。Cr : LiSAF 良好的物理和化学特性使其成为当今固体激光领域新的研究热点。在国际上, Miller 等首先在 1992 年用 Cr : LiSAF 作为增益介质, 在 Z 型腔内加入声光调制器得到 150 fs 的锁模脉冲<sup>[1]</sup>。近年来, 利用氩离子激光泵浦或用二极管激光泵浦的 Cr : LiSAF 激光器已分别获得 33 fs 或 34 fs 的锁模脉冲<sup>[2,3]</sup>。国内最近才有关于利用国产 Cr : LiSAF 晶体实现自锁模的报道<sup>[4,5]</sup>。国内外所有锁模 Cr : LiSAF 等固体激光器都是在四镜腔的结构中实现的。这是因为在自锁模固体激光器中, 一个臂中需插入棱镜对, 以获得色散补偿, 另一个臂中需插入硬光阑, 以便与自聚焦效应相结合, 形成 Kerr-lens 锁模, 但理论和实验都证明, 增益介质作为软光阑也可实现 Kerr-lens 锁模。因此四镜腔中第二个臂是多余的。我们首次采用三镜腔结构实现低泵浦功率下 Cr : LiSAF 激光器的自锁模, 并且较系统地研究了 Cr : LiSAF 激光器连续光、自调  $Q$ 、自锁模和自调  $Q$ -自锁模的运转特性。

## 2 Cr : LiSAF 自锁模激光器的实验装置

Cr : LiSAF 激光器的实验装置如图 1 所示。激光器采用紧凑型的像散补偿三镜腔。 $M_1$ ,  $M_2$  为球面反射镜, 其曲率半径  $R_1 = R_2 = 100 \text{ mm}$ , 构成半共焦半共心内腔,  $M_3, M_3'$  为平面反

\* 现通信地址为: 福建省泉州市, 华侨大学应用物理系(泉州 362011)。

射镜,对 850 nm 光的透过率为 2.5% 左右,  $M_1 \sim M_3$  以 850 nm 为中心波长镀膜,带宽约为 100 nm。Cr : LiSAF 晶体由北京人工晶体所生长,掺杂浓度为 6%,两端面布儒斯特角切割,光轴位于水平面内并与棒轴垂直,通光长度为 4 mm,对波长为 488 nm 的激光的总吸收为 70%。晶体用钢皮包裹,装在铜的冷却管中用水冷却。利用氩离子激光器输出的 488 nm 蓝光泵浦,泵浦光由焦距  $f = 100$  mm 的透镜  $L$  聚焦后经双色镜  $M_2$  进入 Cr : LiSAF 晶体。 $P_1$  和  $P_2$  构成的熔石英棱镜对用来进行腔内色散补偿,压缩脉冲宽度,其距离在实验中调整。在棱镜  $P_2$  和反射镜  $M_3$  之间放置狭缝,其作用是限制频谱范围,滤掉对锁模没有用的频谱成份,减小模式竞争,使增益转移到参与模式锁定的纵模上来。总的腔长为 1000 mm。根据 LiSAF 晶体的折射率 ( $n = 1.41$ )、长度、 $M_1$  镜和  $M_2$  镜的曲率半径,可求出  $M_2$  镜的像散补偿角  $2\theta = 19^\circ$ 。Cr : LiSAF 激光器采用三镜腔结构的优点在于结构紧凑、总的腔长缩短,可得到高重复率的自锁模脉冲;更为重要的是: Kerr-lens 锁模都是工作在靠近腔稳定区域边界的非常狭小的范围内,这使得 Kerr-lens 锁模激光器的调整精度非常高。在四镜腔结构中,锁模区域的寻找又不能靠调整某个腔参数独立实现。这更增加了实现 Kerr-lens 锁模的调整难度。利用三镜腔结构,可独立地改变  $M_1$  到晶体位置的距离,就可方便地找到自锁模区域,从而使三镜腔结构的自锁模变得更为容易。

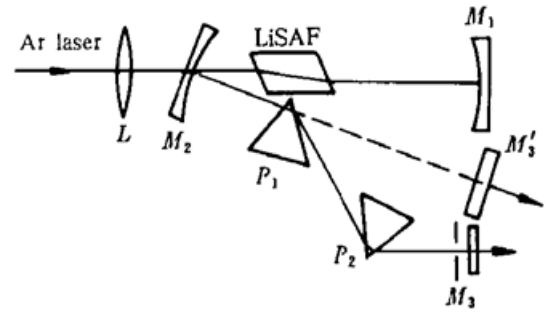


图 1 三镜腔结构的 Cr : LiSAF 激光器的腔结构图

Fig. 1 Schematic of the cavity configuration with three mirrors for the self-mode-locked Cr : LiSAF laser

### 3 Cr : LiSAF 激光器的运转特性

#### 3.1 连续光运转

不插入棱镜  $P_1$  和  $P_2$ , 首先实现 Cr : LiSAF 激光器的连续光运转。细致调整激光器后,连续光阈值可降至 100 mW 左右。激光器输出功率随所吸收的泵浦功率的变化如图 2 所示。实验表明,在较低泵浦功率 ( $< 900$  mW) 情况下,激光器总体斜率效率为 15%; 对应 920 mW 的泵浦功率,输出 112 mW,转换效率为 12.2%; 对应 970 mW 的泵浦功率,输出 113.5 mW,转换效率为 11.7%。由于国产 Cr : LiSAF 晶体的破坏阈值较低,在实验中超过 1 W 的泵浦光经聚焦后就把晶体损伤,所以无法进行较高泵浦功率下的实验。Cr : LiSAF 激光器连续运转时产生的增益饱和现象,除了与热效应造成晶体上能级寿命缩短的因素外<sup>[6]</sup>,主要是上转换过程所致,解释如下。

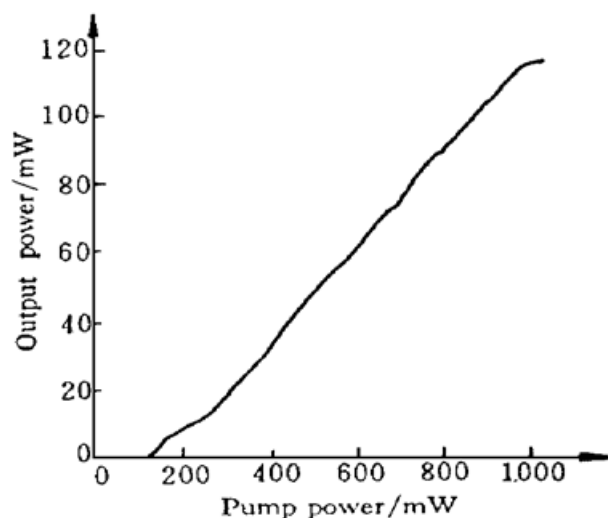


图 2 连续 Cr : LiSAF 激光器输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 2 Variation of output versus pump power for the cw Cr : LiSAF laser

Cr : LiSAF 的能级结构与主要跃迁如图 3 所示。①是吸收 488 nm 泵光的跃迁; ②是受激辐射,产生中心波长 850 nm 的激光; ③与④分别是对激光和泵光的激发态吸收。图中未标出上转换过程。该过程为: 处于  $4T_2$  能级的二个铬离子相互作用,结果使得

Cr : LiSAF 的能级结构与主要跃迁如图 3 所示。①是吸收 488 nm 泵光的跃迁; ②是受激辐射,产生中心波长 850 nm 的激光; ③与④分别是对激光和泵光的激发态吸收。图中未标出上转换过程。该过程为: 处于  $4T_2$  能级的二个铬离子相互作用,结果使得

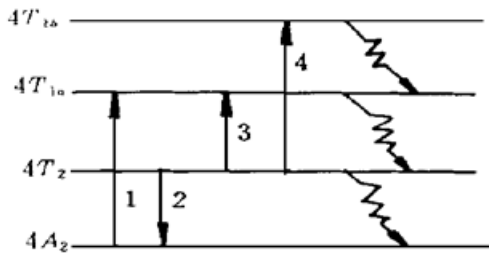


图3 Cr:LiSAF 晶体的能级简图  
Fig. 3 Schematic energy level diagram for Cr:LiSAF

一个铬离子回到基态, 另一个激发到  $4T_{1a}$ , 然后又无辐射跃迁到  $4T_2$ <sup>[7]</sup>。各种过程造成  $4T_2$  能级上铬离子的减少可用下式表示

$$\frac{dN_2}{dt} = - \left[ \frac{I\sigma_e}{h\nu} N_2 + \frac{I_p\sigma_e}{h\nu_p} N_2 + \frac{N_2}{\tau} + \gamma N_2^2 \right] \quad (1)$$

式中,  $I, I_p$  分别为激光和泵光的光强;  $\nu, \nu_p$  分别为激光和泵光的频率;  $\tau$  为  $4T_2$  能级寿命;  $\gamma$  为描述上转换过程的系数。从(1)式可以看出, 上转换过程与  $N_2^2$  成正比, 它限制了铬离子数在  $4T_2$  能级的大量积累, 是造成增益饱和的最主要因素。

### 3.2 自调 Q 运转

插入棱镜对  $P_1$  和  $P_2$  并且加入狭缝, 从  $M_3$  镜输出的连续光功率略有下降。当泵浦功率不超过 750 mW 时, 未出现自锁模, 但却可以观察到稳定的自调 Q 脉冲。自调 Q 非常容易启动, 启动后可以自维持, 即使用手挡住光路, 手放开后, 调 Q 脉冲仍然出现。图 4 是泵浦功率为 750 mW, 狭缝宽度为 1.8 mm 时的自调 Q 脉冲, 脉冲宽度为 400 ns, 脉冲间隔为 10  $\mu$ s。减少泵浦功率或狭缝宽度, 脉冲间隔有所增加。自调 Q 现象可以用自聚焦效应与狭缝相结合引起的等效可饱和吸收体作用来解释<sup>[8]</sup>。由于 LiSAF 晶体的激光上能级寿命  $\tau$  比起光子在腔内的寿命  $t_c$  大很多, 所以可以用弛豫振荡公式来估计脉冲间隔, 即

$$T = 2\pi [t_c \tau / (\gamma - 1)]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $\gamma$  为泵浦功率与阈值功率的比值。利用此式可以解释脉冲间隔随泵浦功率或狭缝宽度的减小而增加的实验现象。

### 3.3 自锁模运转

理论和实验已经表明, 两个小腔镜  $M_1$  和  $M_2$  之间的距离是实现自锁模运转的关键因素, 其大小决定谐振腔是稳定腔, 还是非稳腔, 或是临界腔, 而较易实现自锁模的应是临界腔。为了在实验上找到自锁模区域, 我们首先在插入棱镜后细调激光器, 使连续光输出功率最大, 然后在不改变其它光学元件位置的情况下, 沿腔轴移动  $M_1$  镜, 得到 860 mW 泵浦功率下  $M_1$  为不同位置时所对应的输出功率, 如图 5 所示。当间距为 151.2 mm 时, 输出功率最大, 达 92 mW, 但该位置不能自锁模。只有当间距在 151.8~152.0 mm 范围内(图中阴影部分), 调整合适的狭缝宽度和棱镜间距, 并轻敲  $M_3$  镜, 才能启动自锁模。图 6 为自锁模脉冲序列, 重复频率为 150 MHz。

与掺钛蓝宝石激光器相比, Cr:LiSAF 激光器腔的调整难度大, 自锁模范围窄, 不容易启动, 这主要是由于 Cr:LiSAF 晶体的非线性系数小的缘故。为了增强初始脉冲产生的自聚焦效应, 腔内应有足够高的功率密度。由于 Cr:LiSAF 晶体较低的破坏阈值限制了泵浦功率的提高, 所以必须对腔进行细致的调节以降低激光器的损耗及增加腔内的功率密度。在低功率泵

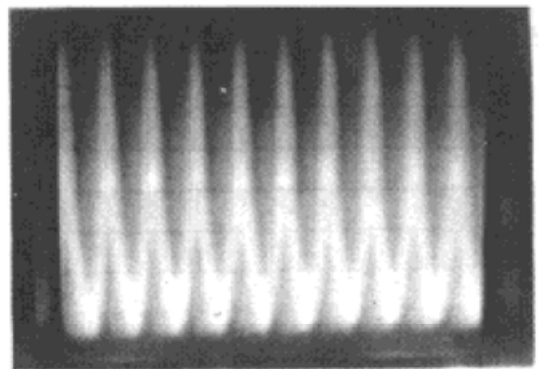


图4 Cr:LiSAF 激光器输出的自调 Q 脉冲序列

Fig. 4 Self-Q switched pulse train of the Cr:LiSAF laser

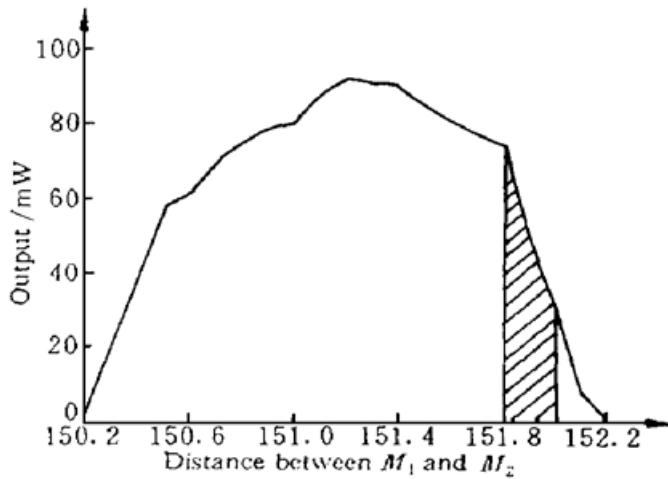


图 5 连续光功率随  $M_1$  与  $M_2$  之间距离的变化  
(锁模区域用阴影表示)

Fig. 5 CW output power of the LiSAF laser versus the distance between  $M_1$  and  $M_2$ . The mode-locking range is indicated by the hatched area

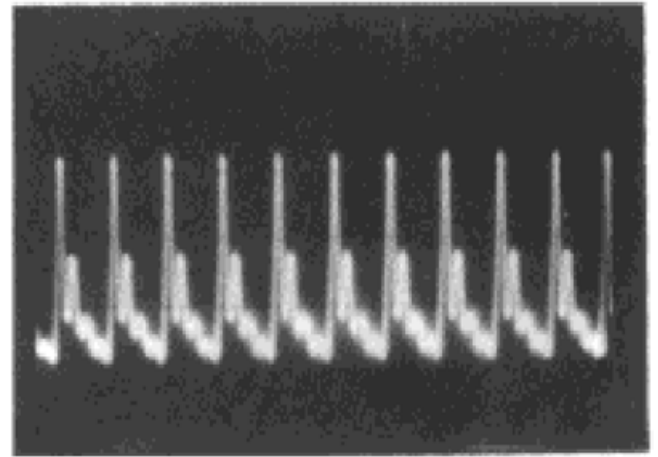


图 6 Cr:LiSAF 激光器输出的自锁模脉冲序列

Fig. 6 Pulse train of the self-mode-locked Cr:LiSAF laser

浦情况下,狭缝对自锁模起了尤其重要的作用,它滤掉了不参与锁模的频谱成份,减小了模式竞争,使参与锁模的频谱成份得到足够的增益,但狭缝也限制了带宽,使脉宽不可能很窄。

在示波器上观察到:自锁模脉冲峰值波动约为 5%;自锁模脉冲序列维持近半小时,但振动输出镜可重新启动自锁模。Cr:LiSAF 自锁模激光器的输出稳定性比掺钛蓝宝石激光器差,其原因是 Cr:LiSAF 晶体的非线性系数较小和热效应较为严重。热效应除了形成晶体的热透镜外,还会造成因上能级寿命缩短而引起的增益下降,从而影响到自聚焦效应,使输出稳定性变差。

通过对腔的精细调整,自锁模阈值 760 mW。随着泵浦功率的增加,脉冲序列稳定性变好,启动也较容易,维持时间也较长。当泵浦功率为 860 mW,棱镜对间距为 450 mm 时,输出功率为 48 mW,对脉冲宽度测量,得到 8:1 的相关曲线如图 7 所示,可以看出脉冲宽度为 51 fs。

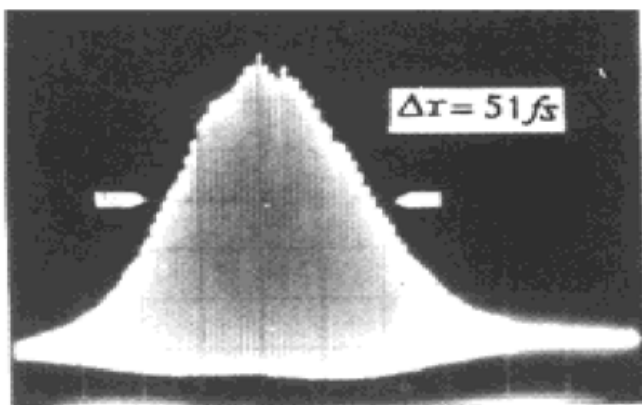


图 7 脉冲序列的干涉相关曲线

Fig. 7 Interferometric autocorrelation of the pulse train

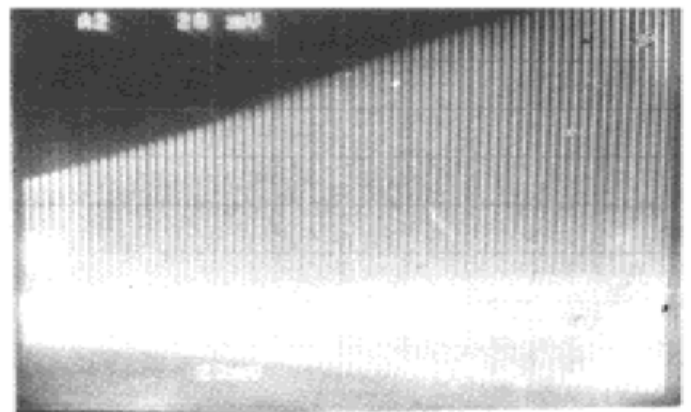


图 8 Cr:LiSAF 激光器输出的自调 Q 自锁模脉冲  
Fig. 8 Self-Q switched and self-mode-locked output from the Cr:LiSAF laser

### 3.4 自调 Q-自锁模运转

在激光器自锁模运转的情况下,使腔镜微量失调或适量减小狭缝宽度,可观察到自调 Q-

自锁模输出,如图 8 所示,自调  $Q$  包络的宽度为  $2 \mu\text{s}$ 。周期为  $5 \mu\text{s}$  左右。自调  $Q$ -自锁模状态下的锁模光脉冲的振幅可以看作是一个快变化时间  $t$  (fs 量级) 同时又被一慢变化时间  $T$  ( $\mu\text{s}$  量级) 调制的函数,这种调制是由于腔内狭缝存在和腔内光强的变化共同引起的,其原理和重复率的自调  $Q$  相同。实验中还发现,自调  $Q$ -自锁模运转时,输出的激光光斑变大,出现高阶横模,脉冲也变宽,这些现象与钛宝石激光器上观察到的一样<sup>[9]</sup>。所不同的是,在相同工作条件下,Cr : LiSAF 激光器自调  $Q$ -自锁模状态更容易出现,调制周期也较大,这主要是由于该晶体激光上能级寿命长的缘故。

### 参 考 文 献

- 1 A. Miller, P. LiKamWa, B. H. T. Chai *et al.*. Generation of 150 fs tunable pulses in Cr : LiSrAlF<sub>6</sub>. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(3): 195~ 197
- 2 N. H. Rizvi, P. M. W. French, J. R. Taylor. Generation of 33-fs pulses from a passively mode-locked Cr<sup>3+</sup> : LiSrAlF<sub>6</sub> laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22): 1605~ 1607
- 3 M. J. P. Dymott, A. I. Ferguson. Self-mode-locked diode-pumped Cr : LiSAF laser producing 34-fs pulses at 42-mW average power. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10): 1157~ 1159
- 4 Ruan Sangchen, Hou Xun, Wang Shuicai. 45 fs Cr : LiSAF laser (letter). *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(8): 691 (in Chinese)
- 5 Dai Jianming, Shen Yuzheng, Zhang Weili *et al.*. Experimental studies on a self-mode-locked Cr : LiSAF laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(7): 889~ 893 (in Chinese)
- 6 M. Stalder, M. Bass, B. H. T. Chai. Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(12): 2271~ 2273
- 7 S. A. Payne, L. K. Smith, R. J. Beach *et al.*. Properties of Cr : LiSrAlF<sub>6</sub> crystals for laser operation. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5526~ 5536
- 8 Yan-Ming Liu, Paul R. Prucnal. Slow amplitude modulation in the pulse train of a self-mode-locked Ti : sapphire laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(10): 2663~ 2669
- 9 Qirong Xing, Weili Zhang, K. M. Yoo. Self- $Q$  switched self-mode-locked Ti : sapphire laser. *Opt. Commun.*, 1995, **119**: 113~ 116

## Research on the Operations of a Cr : LiSAF Laser with a Three-mirror Cavity and Low Pump Power

Wang Jiaxian Liang Hongye Dai Jianming Wang Qingyue

(College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** The investigation on the continuous-wave, self- $Q$  switched, self-mode-locked, and self- $Q$  switched self-mode-locked operations of a Cr : LiSAF laser with a three-mirror cavity and with low pump power from an argon ion laser at the 488 nm line are reported. Without any active modulator or saturable absorber in the cavity, 51-fs pulses at a repetition of 150 MHz and with an average output power of 48 mW for 860 mW pump power are obtained.

**Key words** Cr : LiSAF crystal, continuous-wave, self- $Q$  switched, self-mode-locked