

自锁模 Cr·LiSAF 激光器的实验研究*

戴建明 沈宇震 张伟力 章若冰 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 超快激光研究室, 天津 300072)

方珍意 黄朝恩

(人工晶体研究所, 北京 100018)

摘 要 以功率为 900 mW、波长为 488 nm 的单线氩离子激光作为泵浦源, 在腔内不加任何主动调制器和可饱和吸收体的情况下实现了 Cr·LiSAF 激光器的飞秒级自锁模运转, 得到了脉冲宽度为 40 fs、重复频率为 100 MHz、平均输出功率为 45 mW 的稳定的锁模脉冲序列。

关键词 Cr·LiSAF 晶体, 自锁模, 自聚焦。

1 引 言

Cr·LiSAF($\text{Cr}^{3+}\cdot\text{LiSrAlF}_6$)是继掺钛蓝宝石晶体之后研制成的新型、近红外宽调谐、性能优异的激光晶体之一。与掺钛蓝宝石晶体相比,其主要特点是:Cr·LiSAF晶体的激光上能级粒子寿命长(67 μs),在蓝绿光和红光波段都有吸收,以及在上能级和发射截面之间能够提供良好的平衡从而减小激发态吸收^[1]等。因此, Cr·LiSAF晶体既可作为激光振荡介质,又可作为激光放大介质。在国际上,首先利用 Cr·LiSAF晶体作为增益介质实现超短脉冲激光运转的是在1992年, Miller等人用连续 Kr 激光泵浦,在传统的 Z 型腔 Cr·LiSAF激光器内加入声光调制器得到了脉宽为 150 fs 的锁模脉冲^[2]。随后,相继出现了用氩离子激光器 488 nm (或(476 nm)单谱线泵浦或用半导体二极管激光器泵浦的、在腔内加主动调制器或可饱和吸收体的 Cr·LiSAF 锁模激光器(包括自锁模激光器)^[3-9]。在国内,中科院西安光机所阮双琛等人报道了采用进口 Cr·LiSAF晶体、以 1.8 W 的氩离子激光器 488 nm 单谱线泵浦,在激光腔内加入可饱和吸收体后得到了 45 fs 的锁模脉冲的简讯^[10]。综合国内外文献,绝大多数的 Cr·LiSAF 锁模激光器在腔内都采用主动或被动调制器,以启动锁模脉冲,其原因是 Cr·LiSAF晶体的非线性效应较弱,一般情况下较难实现自锁模运转;而且,采用 488 nm 氩离子泵浦的 Cr·LiSAF 锁模激光器的泵浦功率都在 1.3 W 以上。

本文报道了在全部采用国产器件(包括 Cr·LiSAF晶体),并且在激光腔内不加任何主被动调制器的情况下,用 900 mW 的 488 nm 单线氩离子低功率泵浦,实现了输出脉冲宽度为 40 fs 的 Cr·LiSAF 激光器的稳定的自锁模运转。

* 国家攀登计划资助项目、国家教委光电子信息工程开放实验室部分资助项目。

收稿日期:1997年2月3日;收到修改稿日期:1997年3月31日

2 实验研究

2.1 实验装置

Cr·LiSAF 自锁模激光器的结构如图 1 所示。激光器采用典型的“Z”型像散补偿腔，Cr·LiSAF 晶体由北京人工晶体所生长，两端面以布儒斯特角切割，光轴位于水平面内并与棒轴垂直，通光方向上的长度为 5 mm，质量掺杂浓度为 6%，对波长为 488 nm 的激光束的总的吸收为 70% 左右。以中科院电子所生产的氩离子激光器 488 nm 单谱线泵浦，泵浦光由焦距为 100 mm 的透镜会聚后经双色镜 M₃ 入射到 Cr·LiSAF 晶体，M₂、M₃ 为球面反射镜，曲率半径为 R₂ = R₃ = 100 mm，M₄、M₄' 均为平面输出镜，在其中心波长 850 nm 处的透过率为 2.5% 左右，M₁ 为平面全反镜。P₁ 和 P₂ 构成的熔石英棱镜对用来进行腔内色散补偿，压缩脉宽，棱镜对的间距在实验中根据实际情况而定。总的谐振腔长为 1450 mm 左右，像散补偿角为 15°。P₃、P₄ 为一对与 P₁、P₂ 相对应的石英棱镜，作用有两个，其一是克服从 M₄ 出射的光的空间色散；其二是对输出镜 M₄ 造成的时间色散进行补偿。在激光器自锁模运转后，用天津大学自己研制的 Ultra AC-01 实时相关器(既用来观测 8·1 干涉相关曲线，又用来观测 3·1 强度相关曲线) 监视激光器的输出脉冲宽度及啁啾情况。

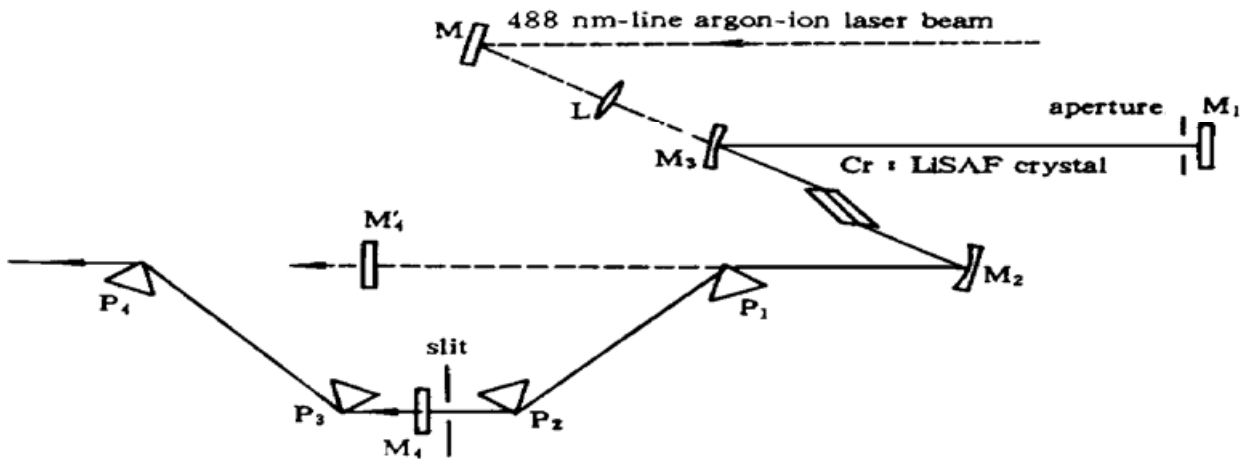


Fig. 1 Schematic of the cavity configuration for self-mode-locked Cr·LiSAF laser

2.2 连续光运转情况

由于 Cr·LiSAF 晶体的损伤阈值较低，尤其是国产 Cr·LiSAF 晶体的损伤阈值相对而言就更低。在实验中，1.1 W 左右的 488 nm 的氩离子单谱线激光束经焦距为 100 mm 的透镜聚焦后就有可能将晶体打坏。因此，详细地了解激光器的连续光运转情况，有效地降低激光阈值，对于实现国产品体的自锁模十分关键。为此，在进行自锁模实验研究之前，先进行了有关的连续光特性的实验研究。

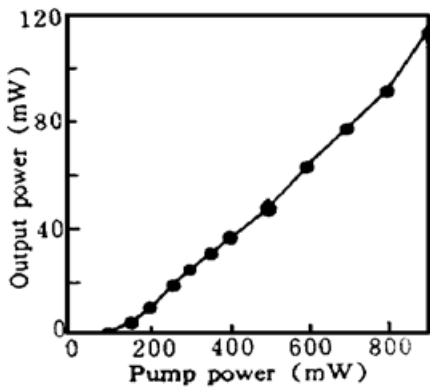


Fig. 2 Variation of output power with-pump power for cw Cr·LiSAF laser with the 2.5% output coupler

连续光实验是在插入棱镜 P₁ 之前进行的。通过对激光器极为细致的调节后，连续光阈值可降到 90 mW 左右，图 2 是不同的泵浦功率下对应的激光器的输出功率的实验曲线。从图中可以看出，连续光的转换效率随着泵浦功率的升高而升高，在泵浦功率为 900 mW 时转换效率可达 12.5%。从总体

上看,斜率效率为 15% 左右。在实验中,由于损伤阈值的原因,所用的晶体表面已有多处被打坏,因此,未对泵浦功率为 1 W 以上的情况作进一步的研究。

2.3 自锁模实验结果及分析

2.3.1 自锁模过程

在上述连续光实验的基础上,用 900 mW 的泵浦功率泵浦,此时 Cr·LiSAF 激光器的输出功率为 110 mW 左右。在腔内插入石英棱镜对 P₁、P₂,并保持总的腔长与插入棱镜前基本相同。这时如果保持除全反镜 M₄ 外的其它腔镜不变,则激光器的输出功率略有下降,约为 100 mW。为实现激光器的自锁模运转,须对激光腔重新进行细致的调节,使之更适合于脉冲锁模运转。最后,用快速光电二极管和激光功率计同时监视 Cr·LiSAF 激光器的输出波形和输出功率,在腔内如图 1 所示的位置分别加入小孔和狭缝并适当调节它们的位置后,连续光的输出功率约为 40 mW,此时轻敲激光器其中的一个端镜或扰动腔内的一个棱镜使可启动锁模。激光器自锁模启动后其输出的平均功率由 40 mW 上升到 45 mW 左右,而且在最佳棱镜间距的情况下脉冲序列非常稳定。图 3 为示波器上观察到的锁模脉冲序列,脉冲峰值波动小于 5%,在一般情况下,脉冲序列可持续维持半小时以上。上述过程中,连续光运转的中心波长在 860 nm 左右,自锁模运转时激光的中心波长约为 855 nm。与掺钛蓝宝石自锁模激光器相比,利用 Cr·LiSAF 晶体进行自锁模,激光器调难度大,锁模范围窄,对应球面镜的间距范围小于 0.2 mm,而且不易于得到稳定的自锁模脉冲序列。这主要是由于 Cr·LiSAF 晶体的非线性系数较小的缘故。

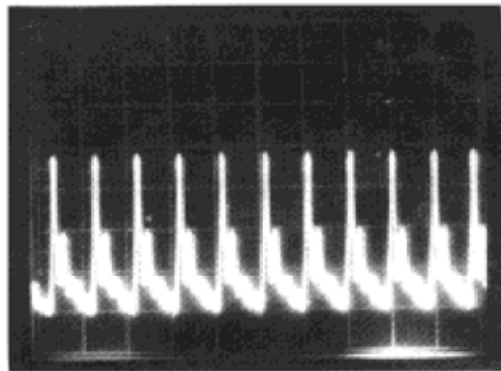


Fig. 3 Pulse train of the self-mode-locked Cr·LiSAF laser

2.3.2 自锁模启动条件和稳定条件分析

自锁模是利用光束通过工作物质产生自聚焦效应与腔内有限孔径光阑的结合而实现的。在自锁模 Cr·LiSAF 激光器中,入射到 Cr·LiSAF 晶体中的光束,由于晶体的非线性效应引起光束的自聚焦,即 $n = n_0 + n_2 |E|^2$ 。由于腔内光阑的存在,光束受一个强度相关的损耗调制,即 $\alpha = \alpha_0 - \beta |E|^2$,在腔内参数及结构适当情况下,腔内功率高的光束比功率低的光束损耗小,相当于一个快饱和吸收体,它对光脉冲的前后沿有压缩作用。在实验中,实现自锁模的首要条件就是要通过对激光器各腔镜、增益介质相对位置、狭缝及小孔的调节,使激光器满足在连续光运转时损耗较高,而在锁模脉冲运转时相对损耗较低;同时需要激光器在连续运转时,腔内有足够高的功率密度,以增加初始脉冲产生的自聚焦效应。此时,在瞬间引入一个扰动,使腔内产生足够强的噪声脉冲作为自锁模的种子脉冲,其在腔内往返的过程中,被不断整形、放大,最后形成稳定的锁模脉冲。从实验现象上看,激光器在连续运转时输出模式一般为多横模,而一旦锁模运转后,输出呈基模状态,并且在激光器由连续运转向自锁模运转过渡时,其输出的平均功率会有不同程度的上升。

由于自锁模是由增益介质的自聚焦效应引起的,自聚焦效应的强弱直接影响到自锁模脉冲序列的稳定性。腔内脉冲的峰值功率密度越高,自聚焦效应就越强,能得到的脉冲序列的稳定性越好。在本实验中,由于激光器的增益较低,为得到稳定的自锁模脉冲,采用了输出比较低的输出镜。实验中,在激光器自锁模运转后,对激光器腔内各腔镜的扰动、泵浦源氩离子激光器的不稳定以及工作环境中灰尘对激光器的干扰等等因素都会破坏自锁模,但通过振动腔内反射镜就可重新启动自锁模。

2.3.3 小孔和狭缝的作用

在本实验中,小孔光阑是用来实现激光器的自锁模运转的,而狭缝的作用是滤去激光器中对于锁模不利的光谱成分,以减少对锁模光谱成分的竞争。实验发现,在激光器自锁模运转的情况下,如果去掉小孔光阑,脉冲序列同样可以自维持,但相对而言稳定性变差而且维持时间变短。但如打开狭缝,则自锁模很快就会消失,此时若再轻敲腔镜或扰动棱镜,可以看到示波器上有脉冲不时地闪出来,维持时间不超过一分钟。经分析认为,由于泵浦功率较低,相应地激光器的增益也较小。而 Cr·LiSAF 晶体的激光光谱又较宽,所以各个光谱成分之间的竞争很激烈,激光器运转时,从频域上看光谱扰动较大,不利于得到稳定的锁模。因而需要用狭缝限制光谱,同时将对锁模不利而又参与竞争的光谱成分滤掉,从而稳定锁模。

2.3.4 泵浦功率对自锁模的影响

在泵浦功率为 900 mW、棱镜间距为 450 mm 时,得到稳定的自锁模,对其脉冲宽度和光谱进行测量,得到的相关曲线如图 4 所示,(a)、(b)分别为 8·1 相关函数曲线和相应的光谱曲线。从图中可看出脉冲宽度为 40 fs,相应的光谱宽度为 20 nm,中心波长为 855 nm 左右。降低泵浦直到刚好还能启动自锁模,得到自锁模阈值泵浦功率为 820 mW 左右,再适当进退腔内棱镜,得到此时的最窄脉宽为 120 fs,相应的光谱宽度为 7 nm,如图 5 所示。以同样的方法得到泵浦功率为 850 mW 时的脉宽为 50 fs,此时的光谱宽度为 13 nm。以上实验结果说明,随着泵浦功率的提高,在相应地调节腔内各光学元件的基础上可以进一步地展宽脉冲的光谱从而得到更窄的脉冲。而且随着泵浦功率的提高,脉冲序列的稳定性变好,维持时间亦

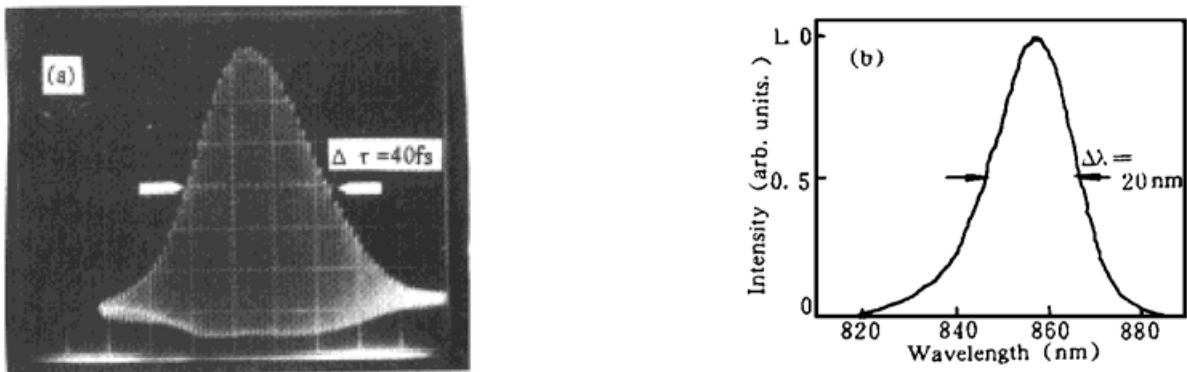


Fig. 4 (a) Interferometric autocorrelation and (b) associated spectrum of the pulse train at a pump power of 900 mW

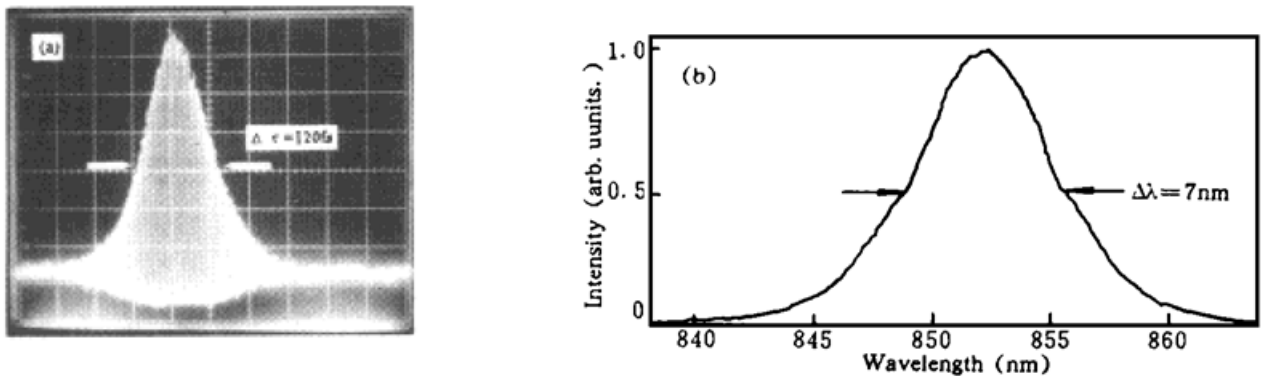


Fig. 5 (a) Interferometric autocorrelation and (b) associated spectrum of the pulse train at a pump power of 820 mW

相应增加。从脉宽随泵浦功率的变化趋势上可看出, 如果再提高泵浦功率, 还可得到更窄的脉冲, 但由于受 Cr·LiSAF 晶体损伤阈值的限制, 未能在更高的泵浦功率下进行实验。

结 论 利用国产 Cr·LiSAF 晶体, 在 900 mW 的 488 nm 的单谱线氩离子激光的泵浦下, 在腔内不加任何主动锁模和被动锁模器件的情况下, 获得了平均功率为 45 mW、脉冲宽度为 40 fs 的稳定的自锁模运转。随着国产 Cr·LiSAF 晶体的质量的不断提高, 将会得到更好的自锁模实验结果。

参 考 文 献

- [1] S. A. Payne, L. K. Smith, R. J. Beach, Properties of Cr·LiSrAlF₆ crystals for laser operation. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5526~ 5536
- [2] A. Miller, P. LiKamWa, B. H. T. Chai, Generation of 150-fs tunable pulses in Cr·LiSrAlF₆. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(3): 195~ 197
- [3] N. H. Rizvi, P. M. W. French, J. R. Taylor, 50-fs pulse generation from a self-starting cw passively mode-locked Cr·LiSrAlF₆ laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(2): 877~ 879
- [4] J. M. Evans, D. E. Spence, W. Sibbett, 50-fs generation from a self-mode-locked Cr·LiSrAlF₆ laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(20): 1447~ 1449
- [5] N. H. Rizvi, P. M. W. French, J. R. Taylor, Generation of 33-fs pulses from a passively mode-locked Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22): 1605~ 1607
- [6] P. M. W. French, R. Mellish, J. R. Taylor, Mode-locked all-solid-state diode-pumped Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22): 1934~ 1936
- [7] J. R. Lincoln, M. J. P. Dymott, A. I. Ferguson, Femtosecond pulses from an all-solid-state Kerr-lens mode-locked Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(16): 1210~ 1212
- [8] M. J. P. Dymott, A. I. Ferguson, Self-mode-locked diode-pumped Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23): 1988~ 1990
- [9] Michael J. P. Dymott, Allister 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
- [10] 阮双琛, 侯 洵, 王水才, 45 fs 掺铬氟化锂锶铝激光器(简讯). *中国激光*, 1996, **23A**(8): 691~

Experimental Studies on a Self-Mode-Locked Cr·LiSAF Laser

Dai Jianming Shen Yuzheng Zhang Weili Zhang Rubing Wang Qingyue
(College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Fang Zheyi Huang Chaoen
(Research Institute of Synthetic Crystal, Beijing 100018)

(Received 3 February 1997; revised 31 March 1997)

Abstract Self-mode-locked operation is achieved in the femtosecond range by using Cr·LiSAF crystals without any active modulator or saturable absorber in the laser cavity. And with 900 mW pump power from an argon-ion laser of 488 nm line, pulses as short as 40 fs are obtained at the repetition-rate of 100 MHz and average output power of 45 mW.

Key words Cr·LiSAF crystals, self-mode-locked, self-focus.