

激光二极管泵浦的准连续运转飞秒 Cr·LiSAF 激光器*

毛艳丽 阮双琛** 杨建军

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 报道国内第一台用 670 nm 激光二极管泵浦的准连续锁模运转的 Cr·LiSAF 激光器。对于连续运转, 泵浦阈值功率 240 mW, 当吸收功率为 368 mW 时, 得到 4 mW 的输出, 输出波长 850 nm, 斜效率为 3.5%。在准连续运转(100 Hz, 占空比 1/5)时, 泵浦阈值功率 46 mW, 斜效率为 9.8%。用染料作为锁模启动介质, 实现了准连续锁模运转, 光脉冲输出的中心波长为 850 nm。
关键词 激光二极管, Cr·LiSAF, 准连续锁模。

1 引 言

80 年代, 掺钛蓝宝石晶体的出现, 使固体激光器得以迅速发展, 特别是自锁模技术的出现, 使超快激光技术几乎发生了革命性的变化, 在国际上用氩离子激光器泵浦钛宝石晶体, 已产生了脉宽约为 6.5 fs 的光脉冲^[1], 但钛宝石晶体不适于用半导体激光器直接泵浦, 而半导体泵浦固体激光器(DPL)以其体积小、重量轻、效率高、长寿命和全固态等优点成为国际上新型激光器的发展热点。Cr·LiSAF 晶体有非常宽的辐射线宽(780~ 1020 nm), 它增益高, 激发态吸收小, 有更长的上能级寿命和足够的发射截面等优势, 并且在红光区域有很强的吸收, 适合于红光半导体激光器直接泵浦。1990 年 Dixon 首次实现了红光 AlGaInP 二极管泵浦 Cr·LiSAF 激光器自由运转^[2], 1993 年 French 等人首次实现了半导体泵浦 Cr·LiSAF 激光器的锁模运转, 其脉宽为 300 ps^[3], 目前国际上几十飞秒的光脉冲也已获得^[4, 5], 国内在这方面的研究工作较少, 作者曾报道过 Ar⁺ 泵浦的 Cr·LiSAF 激光器^[6, 7]和半导体泵浦的 Cr·LiSAF 激光器^[8~ 10], 在以前研制的半导体泵浦 Cr·LiSAF 连续和准连续运转的基础上, 作者最近又研制成功了准连续锁模运转的 Cr·LiSAF 激光器, 获得中心波长 850 nm 的光脉冲输出。

2 实验装置及结果

2.1 连续运转

连续运转的实验装置如图 1 所示。实验中, 采用的 Cr·LiSAF 晶体尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 3$

* 中科院院长基金资助课题。

** 现通信地址: 深圳大学工程技术学院, 深圳 518060。

收稿日期: 1998-01-08; 收到修改稿日期: 1998-06-08

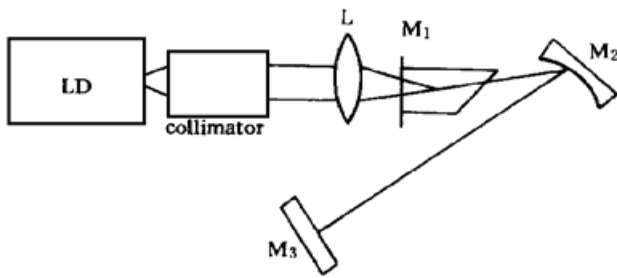


Fig. 1 Schematic of the experimental setup of Cr : LiSAF CW laser

mm, 掺杂质量分数为 5.5%, 晶体一端为平面, 另一端为布儒斯特角切割, 平面一端镀双色膜, 对 800~ 900 nm 光全反, 在 670 nm 的透过率为 95%。晶体用铜皮包裹, 置于铜块上, 通水冷却。M₂ 镜为 R = 100 mm 的全反镜, M₃ 为输出镜, 对 800~ 900 nm 的光辐射反射率为 99%。L 是焦距为 12 mm 的聚焦镜。采用 AlGaInP 激光二极管, 通过直径为 400 μm 的光纤耦合输出, 其波长为 670 nm, 发散角 50°, 数值孔径 0.4。对如此

大的发散角和数值孔径的光束, 要准直、聚焦使其达到腰斑半径小于激光光束腰的理想情况是很困难的, 又由于 Cr ·LiSAF 的热传导系数小, 这就导致了晶体的热效应。在最初的实验中, 用自来水冷却晶体, 用 1% 的输出镜一直不能实现连续运转, 后来采用专门的冷却系统, 使晶体的温度降到室温以下, 实现了连续运转。图 2 是连续运转时最大输出功率随晶体冷却温度的变化情况。冷却温度为 12℃ 时, 最大输出功率仅 0.5 mW 左右, 当冷却到 0℃ 时, 其最大输出功率可达 4 mW。其原因是, 绝大部分输入能量都转变为热能, 使工作物质温度升高, 工作物质发热后引起本身温度升高和温度分布不均匀。温度升高后, 将导致激活离子的量子效率降低, 而使激光器的阈值升高和效率降低, 温度的不均匀分布则会产生热透镜效应、热应力和热应力双折射等热畸变, 对 Cr ·LiSAF 晶体来说, 最直接的影响是荧光寿命的温度猝灭。

荧光寿命的温度猝灭体现了辐射跃迁和非辐射跃迁之间的竞争。实际上荧光上能级寿命 τ 可以看作有两部分组成, 辐射部分 τ_R 和非辐射部分 τ_{NR} , τ 可以表示为

$$1/\tau(T) = 1/\tau_R(T) + 1/\tau_{NR}(T)$$

其中

$$\tau_{NR}(T) = T_{NR}^0 \exp(\Delta E/KT)$$

$T_{NR}^0 = 2.4 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$, T 为热力学温度, ΔE 为激活能, K 为玻耳兹曼常数。

在低温时, 非辐射跃迁部分可以忽略, 荧光寿命基本不变, 在高温时非辐射跃迁占优势, 非辐射衰变过程变得非常重要, 荧光寿命随温度升高迅速减小, 随 $1/KT$ 的增加而呈线性衰减。图 3 是 0℃ 时, 其输出功率与吸收泵浦功率的变化关系, 阈值为 240 mW, 在吸收功率为 368 mW 时, 得到 4 mW 的连续波输出, 波长在 850 nm 附近, 其斜率效率 S_e 为 3.5%。

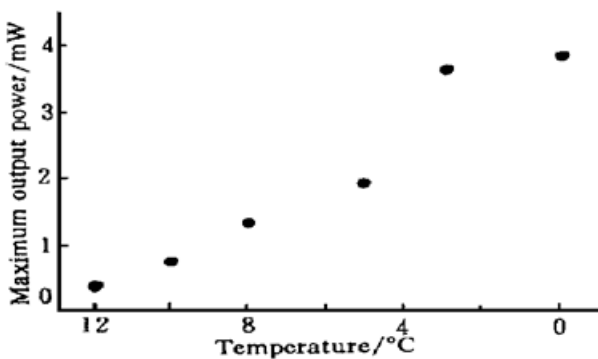


Fig. 2 The maximum output power vs colling temperature

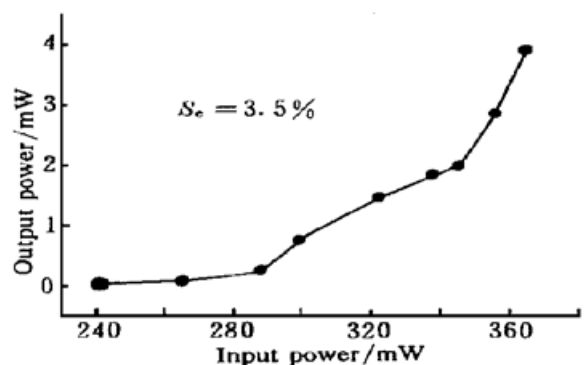


Fig. 3 CW output power vs pump power

2.2 准连续锁模运转

为避免晶体产生热效应, 使激光二极管工作在准连续状态(100 Hz, 2 ms, 占空比1/5), 这时所测的输入-输出曲线如图 4 所示, 泵浦阈值功率为 46 mW, 斜效率提高为 9.8%。

由于 Cr·LiSAF 晶体的非线性比钛宝石弱, 又受腔内功率所限, 一般比较难于实现自锁模, 目前常用方法是在腔内加染料、多量子阱或玻璃片以及声光调制器等作为锁模介质或元件来实现稳定锁模。在这种准连续状态下作者采用染料作为锁模启动介质进行锁模, 整体结构如图 5 所示。上半部分结构同前, M_4 、 M_5 是 $R = 50$ mm 的全反镜, 采用的染料是 Neocya-

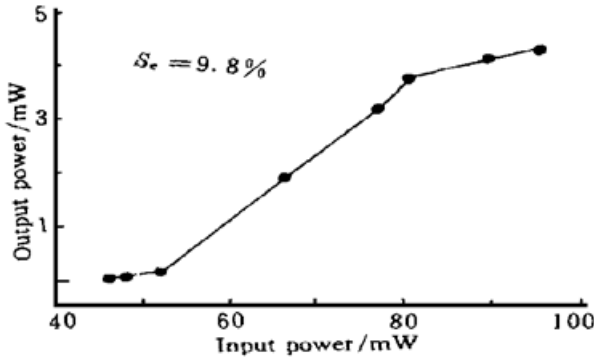


Fig. 4 Output power vs input power in quasi-CW operation

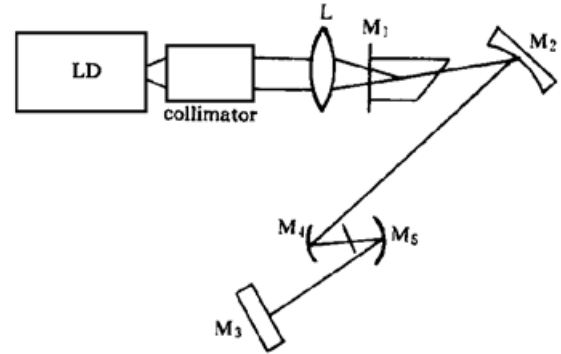


Fig. 5 Schematic of the experimental setup of mode-locked Cr·LiSAF laser

nine, 染料溶在乙二醇中, 浓度为 2×10^{-5} M/L。仔细调节染料喷膜的位置, 使其置于 M_4 与 M_5 的共焦点上, 在吸收泵浦平均功率为 95 mW 时, 实现了稳定的锁模运转。如图 6 所示, 图 6(a) 表示锁模脉冲序列, 图 6(b) 表示锁模以后的脉冲包络。锁模脉冲的时间间隔为 $\Delta t = 2L/c$, 实验中的腔长 $L = 1.1$ m, $\Delta t = 7$ ns, 而准连续下锁模的整个包络约为 $18 \mu\text{s}$, 在这个包络中将会有 2600 个锁模脉冲, 所以从包络里难以分辨出每一个锁模脉冲, 放慢示波器扫描速度, 使其置于 7 ns/div, 可以看到每一格中基本上是一个锁模脉冲。



Fig. 6 Mode-locking pulses. (a) The part of the mode-locking pulses train, (b) The whole envelope of the mode-pulses

实验中发现, 要实现锁模, 对泵浦光脉冲宽度有一定的限制, 当脉宽小于 $600 \mu\text{s}$ 时, 没有观察到锁模脉冲, 当泵浦脉宽在 $600 \mu\text{s}$ 以上, 获得了锁模脉冲, 关于这一点 Kuizenga^[11] 在脉冲泵浦锁模 Nd·YAG 一文中给予了详细的理论分析和说明。图 6 是 2 ms 泵浦脉宽下的锁模脉冲。

用光谱分析仪测得其光谱曲线如图 7 所示, 锁模脉冲的中心波长 850 nm, 光谱

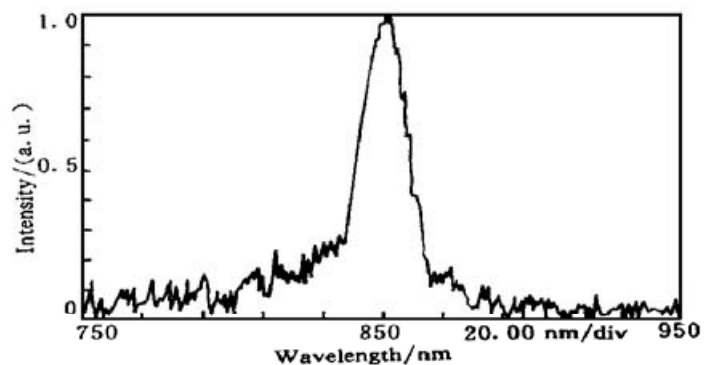


Fig. 7 Associated spectrum

半宽 18 nm, 如果假设光脉冲形状为双曲正割型, $\Delta t \Delta \nu = 0.315$, 此光谱宽度可支撑极限光脉冲宽度为 42 fs。

结 论 利用专门的冷却系统解决了晶体的热效应问题, 实现了激光二极管泵浦 Cr·LiSAF 晶体的连续运转, 在 0°C 时最大输出达 4 mW, 估计继续降低冷却温度, 输出功率将会进一步增大, 但同时也将导致热应力的增大, 当热应力超过晶体的承受极限时, 晶体将会被破坏。另外会使晶体表面产生水雾, 导致激光器不能运转, 所以冷却温度要控制适度。用染料作为锁模启动介质, 实现了准连续下的锁模运转。

参 考 文 献

- [1] Jung I D, Kartner F X, Matuschek *et al.*. Self-starting 6.5fs pulses from a Ti·Sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 1009~ 1011
- [2] Dixon G J, Zhang Q, Chai B H T. Electronically tuned diode-laser-pumped Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1): 43~ 45
- [3] French P M W, Mellish R, Taylor J R *et al.*. Mode-locked all-solid-state diode-pumped Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22): 1934~ 1936
- [4] Falcoz F, Balembois F, Georges P *et al.*. Self-starting self-mode-locked femtosecond diode-pumped Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18): 1874~ 1876
- [5] Dymott M J P, Ferguson A I. Self-mode-locked diode-pumped Cr·LiSAF laser producing 34-fs pulses at 42-mW average power. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10): 1157~ 1159
- [6] 阮双琛, 侯 洵, 王水才等. 可调谐连续波 Cr·LiSAF 激光器的研究. 激光与光电子学进展, 1995, (11): 9~ 10
- [7] 阮双琛, 侯 洵, 王水才. 45 fs 掺铬氟化锂铝激光器. 中国激光, 1996, **A23**(8): 691
- [8] 杜戈果, 毛艳丽, 阮双琛. 半导体泵浦 Cr·LiSAF 可调谐激光器. 中国激光, 1998, **A25**(3): 209~ 212
- [9] 毛艳丽, 阮双琛, 侯 洵. LD 泵浦准连续运转 Cr·LiSAF 激光器谐振腔的设计与实验研究. 光子学报, 1997, **26**(12): 1107~ 1110
- [10] 阮双琛, 杜戈果, 侯 洵. 半导体激光器泵浦的 Cr·LiSAF 激光器. 光子学报, 1997, **26**(3): 201~ 202
- [11] Kuizenga D J. Short pulse oscillator development for the Nd·Glass laser fusion systems. *IEEE J Quant. Elect.*, 1981, **QE-17**(9): 1694~ 1708

Quasi-Continuous-Wave Mode-Locked Laser Diode-Pumped

Mao Yanli Ruan Shuangchen Yang Jianjun

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 8 January 1998; revised 8 June 1998)

Abstract The first quasi-cw mode locked laser diode pumped Cr·LiSAF laser was demonstrated in China. Pumped by AlGaInp laser diode emitting near 670 nm, 4 mW CW output at 850 nm was obtained when the absorbed pumped power of 368 mW. In quasi-continuous wave operation, the femtosecond pulse was obtained at 850 nm with Neocyanine dye.

Key words laser diode, Cr·LiSAF, quasi-continuous-wave mode locked.