

Nd·LMA 激光器的附加脉冲锁模

沈小华 王 春

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

杨鸿儒 阎兴隆

(中国科学院西安光机所 西安 710068)

提要 用半导体激光泵浦 Nd·LMA 激光器在 $1.054 \mu\text{m}$ 波长处获得连续 650 mW 的激光输出, 斜效率达 33%。利用一个包含光纤的非线性外腔, 实现了自启动的 Nd·LMA 附加脉冲锁模, 输出平均功率为 58 mW 的接近带宽转移极限的 1.8 ps 超短脉冲激光。

关键词 附加脉冲锁模, 自启动, 非线性外腔

1 引 言

连续激光器的被动锁模能产生皮秒到飞秒的超短脉冲激光, 在这类激光器中需要足够高的功率密度才能自启动锁模, 因此存在一个产生自启动锁模的阈值功率密度。在染料、色心激光器里, 由于短的上能级寿命可以有效地促进脉冲缩短过程, 容易实现自启动的被动锁模。但对于固体激光器, 长的激发态寿命使这个过程不易实现, 必须借助于一种快的有明显非线性作用的饱和吸收体才能产生被动的自启动锁模。近年发展起来的附加脉冲锁模(APM), 就是一种很适合于固体激光器产生超短脉冲的技术^[1-3]。在 APM 中, 利用外腔的光纤对激光产生随光强而变的非线性调制, 返回主腔后与主腔里的光产生相干迭加, 在一定条件下, 这种作用相当于一种非线性饱和吸收体。APM 可以在较低的腔内功率下实现自启动被动锁模, 并获得比主动锁模短一个量级的超短脉冲^[4]。

与 Nd·YAG, Nd·YLF 晶体相比, Nd·LMA 有一个显著的优点就是高掺杂, 掺杂浓度达到 10 at.-%, 也不会发生浓度猝灭效应, 因此能实现高储能, 适合于做高功率激光器的晶体材料^[5]。Nd·LMA 晶体在 $1.054 \mu\text{m}$, $1.065 \mu\text{m}$ 和 $1.08 \mu\text{m}$ 有三个荧光发射带。J. Hamel 在这三个带上都获得连续的激光输出^[6]。Nd·LMA 的 $1.054 \mu\text{m}$ 发射带与掺钕的磷玻璃放大介质非常接近, 使这种材料非常适合做高功率钕玻璃超短脉冲激光系统振荡级和前置放大级的激光介质。

本文报道用半导体激光泵浦的附加脉冲锁模技术从 Nd·LMA 激光器输出 CW ps 级超短脉冲的实验结果。

2 Nd·LMA 激光器的 APM 主腔设计和连续运转

图 1 是半导体激光泵浦的 Nd·LMA 附加脉冲锁模的实验装置图, 图中主腔是一个三镜

* 国家高技术 863-416 激光青年基金项目资助课题。

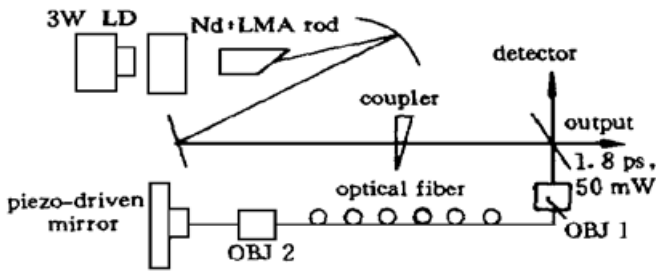


图1 自启动附加脉冲锁模 Nd·LMA 激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the self-starting APM Nd·LMA laser

折叠腔, 这种腔的结构在保证较低的阈值前提下, 又突破了腔长的限制, 容易实现锁模激光器所需的腔长要求。Nd·LMA 的激光介质放在较短的一臂, 在这一端腔内有较小的束腰半径。为防止出现标准具效应, Nd·LMA 晶体以沿 c 轴的布儒斯特角切割, 尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$, 掺杂浓度为 10 at.-%。在 Nd·LMA 的平面端镀 790 nm 高透、 $1.054 \mu\text{m}$ 全反的双色膜。泵浦源是一 3 W 的半导体激光器 (SDL-2342), 其发射波长能被调节到 LMA 的 790 nm 的吸收峰附近。泵浦光束经整形后在焦点处光斑大小为 $140 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ 。

由于附加脉冲锁模的需要, 主腔的输出光束将被耦合到一单模光纤内, 这个耦合效率直接关系到附加脉冲锁模能否顺利启动, 为实现高效耦合, 对主腔的输出光束空间分布要求非常高, 必须消除输出光束的像散。对于图 1 所示的主腔, 有两个元件可能造成光束的像散, 一是 Nd·LMA 的布儒斯特角面, 另一个是折迭的凹面反射镜。经分析, 通过合理设计, 这两个元件产生的像散可以相互补偿, 在主腔输出端实现完全的像散补偿。图 2 是主腔中子午面和弧矢面内的束腰半径随腔长变化的曲线, 腔内棒到凹面镜的距离为 32 cm, 凹面镜到输出镜的距离为 79 cm, 主腔腔长为 112 cm, 折迭角为 10.6° 时, 利用往返矩阵计算得到主腔腔内各处的子午面和弧矢面的光斑半径, 从图中曲线可知在主腔输出端的子午面和弧矢面有同样大小的光束半径, 说明在这一端已实现了像散补偿, 但在泵浦端的光束模式仍是像散的, 考虑到泵浦光束也是像散的, 如果让这两者的像散方向一致, 还可以提高泵浦光束的效率, 所以在这一臂对激光束的像散不必校正。

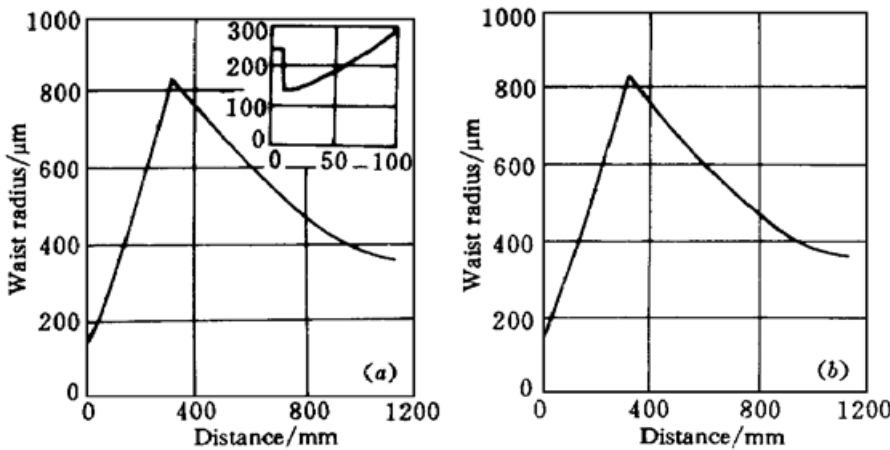


图2 主腔中的束腰半径
(a) 子午面; (b) 弧矢面

Fig. 2 Waist radii in the master cavity
(a) tangential; (b) sagittal

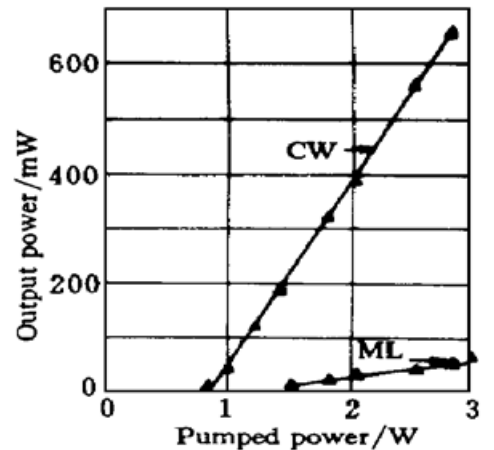


图3 主腔的输入-输出特性曲线

Fig. 3 Output power as a function of the pump power

实验中对主腔进行合理调准后, 激光器不管是在低功率还是高功率泵浦下, 主腔输出都是圆的基模光束, 这就验证了主腔设计的合理性。图 3 是输出耦合透过率为 10% 时, 主腔的输入-输出特性曲线, 它的阈值泵浦功率为 0.84 W, 最大输出功率为 650 mW, 斜效率为 33%。

3 Nd:YMA 的 APM 实验结果

图 1 中的附腔由主腔的输出镜、分束器、单模光纤和全反镜组成。为了实现低功率下的自启动 APM 锁模, 希望有较高比例的主腔输出光能被注入到光纤, 因此取分束器的反射率较高, 为 85%。单模光纤的长度为 1.2 m, 芯径为 $9 \mu\text{m}$, $NA = 0.11$, 非线性折射率 $D = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。在光纤的两端分别用两个 20 倍的显微物镜对光纤进行耦合, 物镜内所有镜片均镀 $1.06 \mu\text{m}$ 的增透膜, 在物镜与光纤之间用甘油实现折射率匹配, 以消除光纤的端面反射, 整个耦合系统的效率约 60%。全反镜固定在一压电陶瓷上, 在伺服反馈系统的驱动下能在一定范围自动调节外腔的腔长, 为 APM 的自启动创造所需的腔长匹配条件, 并保持 APM 启动后的稳定工作。整个外腔的腔长是主腔的两倍。

实验中, 使主腔和外腔的光纤耦合系统都调节到最佳状态, 手动粗调外腔腔长, 使之与主腔腔长基本相等, 再利用伺服反馈系统在小范围内对腔长自动跟踪, 实现完全的腔长匹配。当泵浦功率大于 1.5 W 时, 激光器实现自启动的 APM, 这时从主腔耦合到光纤的功率为 90 mW。在 3 W 的泵浦功率下, 最大的 APM 输出平均功率为 58 mW, 图 4 为 Nd:YMA 输出激光的脉冲序列, 其重复频率为 130 MHz。用一个实时自相关仪测量 APM 产生的脉冲宽度, 图 5 是所得的自相关信号曲线, 它对应的脉冲宽度为 1.8 ps。用一光栅光谱仪测量锁模脉冲的频谱, 它的谱宽为 0.86 nm。经简单的计算得该脉冲的带宽积为 0.42, 已接近 Sech^2 脉冲的带宽极限, 外腔的光纤将产生正的群色散, 在本实验装置中没有相应的负色散补偿机构, 正的群色散将对脉冲起展宽作用, 这是 APM 产生的脉冲没到 Sech^2 脉冲带宽转移极限的原因。

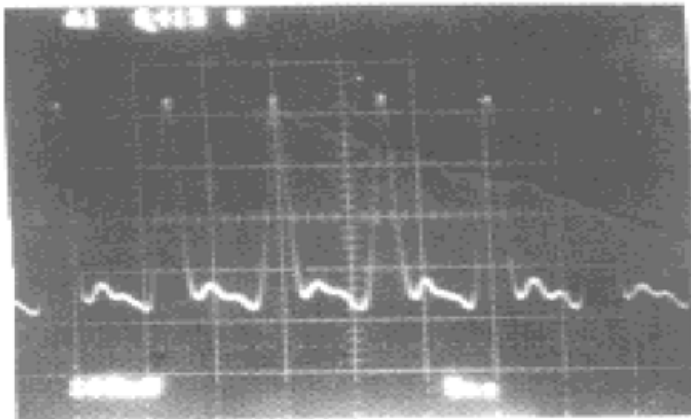


图 4 附加脉冲锁模激光器输出的锁模激光脉冲序列
Fig. 4 Pulse train of APM

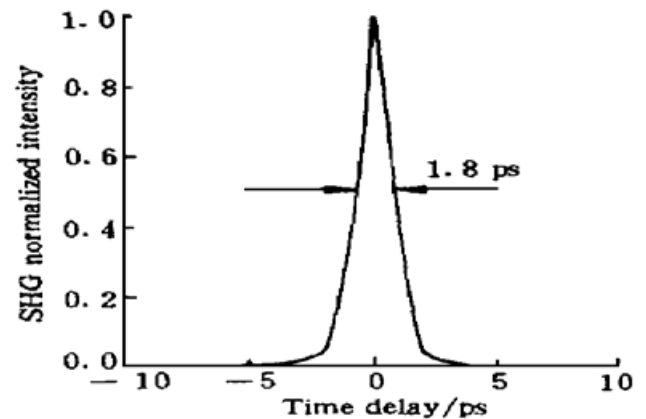


图 5 附加脉冲锁模的脉冲自相关信号曲线
Fig. 5 Autocorrelator trace of APM pulses

4 小 结

在实验室演示了一种结构紧凑的优质超短脉冲光源。但附加脉冲锁模对实验室的环境要求比较高, 特别是振动, 要保持长期稳定的运转, 必须尽量减少不必要的扰动, 并要有一个可靠的负反馈控制系统。

参 考 文 献

- 1 J. Mark, L. Y. Liu, K. L. Hall *et al.*. Femtosecond pulse generation in a laser with a nonlinear external resonator. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(1) : 48~ 50

- 2 J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fujimoto *et al.*. Femtosecond passively mode-locked Ti:Al₂O₃ laser with a nonlinear external cavity. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20) : 1125~ 1127
- 3 E. P. Ippen, H. A. Haus, L. Y. Liu. Additive pulse mode locking. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(9) : 1736~ 1745
- 4 L. Y. Liu, J. M. Huxley, E. P. Ippen *et al.*. Self-starting additive-pulse mode locking of a Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(10) : 553~ 555
- 5 Zhang Xiurong, Zhang Xinming, Xu Jun *et al.*. Laser properties of lamp pumped La_{1-x}MgNd_xAl₁₁O₁₉ crystals. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1992, **A19**(7) : 496~ 498 (in Chinese)
- 6 Joseph Hamel, Amine Cassimi, Hassan Abu-Safia *et al.*. Diode pumping of LNA lasers for helium optical pumping. *Opt. Comm.*, 1987, **63**(2) : 114~ 117

Additive Pulse Mode Locking of a Nd:LiMgAl Laser

Shen Xiaohua Wang Chun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Yang Hongru Yan Xinglong

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

Abstract A diode laser pumped Nd:LiMgAl laser was reported, in which a CW power of 650 mW with a slope efficiency of 33% at 1.054 μm was demonstrated. Using a fiber-nonlinear additive cavity, self-starting additive pulse mode locking was realized. Near transform-limited pulses as short as 1.8 ps with an average power of 58 mW were obtained from the laser.

Key words additive pulse mode locking, self starting, nonlinear external cavity