

二极管端面泵浦的附加脉冲锁模 的 Nd·YLF 激光器*

王 春 沈小华 陈绍和 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 研究了二极管端面泵浦的附加脉冲锁模的 Nd·YLF 激光器, 并分析了脉冲压缩原理及自启动机制。在最大泵浦功率为 2.4 W 时, 得到重复频率为 134 MHz、脉宽为 2 ps、有效输出功率 76 mW、相应峰值功率为 283 W、波长为 1.053 μm 的稳定的连续锁模脉冲序列。

关键词 二极管泵浦, 附加脉冲锁模, 自启动。

1 引 言

近年来, 由于激光二极管的发展, 人们对高功率、高效率全固化激光系统产生了浓厚兴趣。掺 Nd^{3+} 的激光介质因其吸收带与激光二极管的发射波长的良好匹配使其成为二极管泵浦的主要介质激光之一。

主动锁模的 Nd·YLF、Nd·YAG、Nd·Glass^[1~6] 激光器已获得极大成功并得到短至 7 ps^[6] 的锁模脉冲。采用附加脉冲锁模的方法在二极管泵浦的 Nd·YAG 激光器^[7] 中已获得脉宽为 1.7 ps 的超短脉冲, 而在二极管泵浦的 Nd·YLF 激光器中获得了脉宽为 1.5 ps^[8] 的超短脉冲。在国内这方面的研究较少, 西安光机所阎兴隆等作者报道了脉宽为 2.8 ps 的二极管泵浦的 Nd·YLF 附加脉冲锁模激光器^[9]。附加脉冲锁模是在激光器主腔上附加一个非线性外腔, 分束到外腔的脉冲在通过外腔中的介质时产生啁啾, 再反馈回主腔与无啁啾的主脉冲叠加, 通过主腔与附加腔腔长的合适匹配, 相干叠加的结果使脉冲在峰值处干涉相长, 在两翼处干涉相消。本文研究了 3 W 二极管端面端面泵浦的附加脉冲锁模的 Nd·YLF 激光器并得到了脉宽 $\Delta\tau = 2$ ps、带宽 $\Delta\nu = 165$ GHz 的超短脉冲。

2 附加脉冲锁模脉冲压缩原理

附加脉冲锁模激光器的主腔和耦合腔的示意图如图 1 所示。在图 1 中, a_1 、 b_1 和 a_2 、 b_2 分别代表主腔和附加腔在分束器 BS 上的入射波和反射波的复振幅, 设 r 为 BS 的反射率, 则有:

$$b_1 = r a_1 + \sqrt{1 - r^2} a_2 \quad (1)$$

* 国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1997-11-06; 收到修改稿日期: 1998-01-07

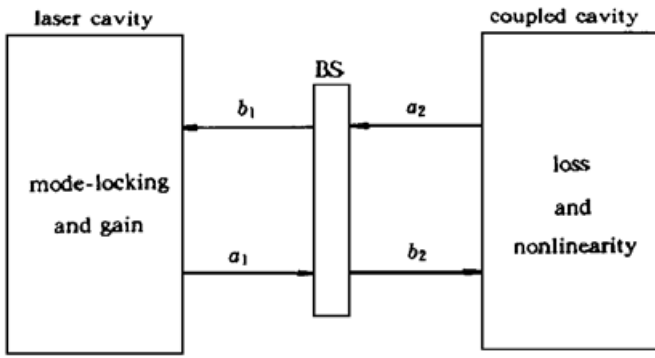


Fig. 1 Schematic of laser cavity and coupled cavity

$$b_2 = \sqrt{1 - r^2} a_1 - r a_2 \quad (2)$$

$b_2(t)$ 在外腔非线性介质中传输时的衰减因子设为 $L (L < 1)$, 假定外腔与主腔腔长成整数倍关系, 那么因传播引起的相移可以不再考虑, 在忽略群速度色散的情况下:

$$a_2(t) = L b_2(t) \exp \left(- j \{ \Psi + \kappa [|a_2(t)|^2 - |a_2(0)|^2] \} \right) = L b_2(t) \exp [- j(\Psi + \Phi)] \quad (3)$$

在 $t = 0$ 时, $a_2(t)$ 对应脉冲的峰值 $a_2(0)$ 。 Φ 是

由外腔非线性引起的相移

$$\Phi = \kappa [|a_2(t)|^2 - |a_2(0)|^2] \quad (4)$$

κ 正比于光纤长度及其非线性折射率。由于 Φ 中已减去了峰值的非线性相移 $\kappa |a_2(0)|^2$, 因此 Ψ 应包括由腔长失配引起的相位偏值和峰值非线性相移引起的相位偏值。

由 (1)、(2)、(3) 式可以求得:

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - r^2}} \left\{ 1 + \frac{r}{L} \exp [j(\Psi + \Phi)] \right\} a_2 \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - r^2}} \left\{ r + \frac{1}{L} \exp [j(\Psi + \Phi)] \right\} a_2 \quad (6)$$

于是反射系数 Γ 由下式给出:

$$\Gamma = \frac{b_1}{a_1} = \frac{1 + (r/L) \exp [j(\Psi + \Phi)]}{r + (1/L) \exp [j(\Psi + \Phi)]} \quad (7)$$

在 $L \ll 1$ 时, (7) 式可展开为:

$$\Gamma \approx r + L(1 - r^2) \exp [- j(\Psi + \Phi)] \quad (8)$$

在 Φ 很小时, 可以将 $\exp(-j\Phi)$ 展开, 于是:

$$\Gamma \approx r + L(1 - r^2)(1 - j\Phi) \exp(-j\Psi) \quad (9)$$

为使 Φ 变化时 $|\Gamma|$ 有最大的变化, 则应有 $\Psi = \pm \pi/2$, 由 (4) 式可知, 在峰值处 $\Phi = 0$, 两翼处 Φ 为负值, 显然当 $\Psi = -\pi/2$ 时, 将会导致反射率 Γ 随 Φ 的负增长而降低。在 $\Psi = -\pi/2$ 时, 有:

$$|\Gamma| \approx r + L(1 - r^2) \Phi \quad (10)$$

由上式可以看出, 脉冲峰值处反射率最大, 两翼逐渐减小, 这就是附加脉冲锁模脉冲压缩的原理, 同时也清楚表明了相位偏值的重要性, 此时两翼有更好的干涉相消的效果, 脉冲压缩效应最显著。

3 附加脉冲锁模的自启动

关于附加脉冲锁模的研究表明^[10, 11], 主腔和附加腔的耦合可以看作反射率随强度变化的端镜, 在调整适当的情况下, 每一次反射过程中都使脉冲缩短, 直至带宽和色散使脉冲的展宽与之达到平衡, 当两腔长的静态相移使反射率随腔内光强度成线性变化时, 脉冲压缩最强, 此时动态反射率可表示为往返增益的动态变化:

$$\Delta g = ks(t) \quad (11)$$

$s(t)$ 为光子流量相对于平均光子流量 S_0 的起伏, k 为比例常数, 对于附加脉冲锁模, k 取决于非线性损耗和耦合系数。脉冲在激光腔内往返振荡时, 有一个总的净增益增加, 但波峰与两翼处各不相同。净增益的增加使脉冲的振幅不稳定, 同时也是脉冲向锁模稳态演化的重要因素。假定激光介质的响应时间足够长, 使得只有平均光功率才能使之饱和, 此时锁模应能在起伏中自启动。如果考虑动态增益, 自启动不会如此容易。假如增益介质的恢复时间比起伏时间慢, 可直接由速率方程分析中得到起伏使增益的变化为:

$$\Delta g = -\sigma g \int_{-\infty}^t s(t) dt \quad (12)$$

g 为扰动以前的饱和增益, σ 为介质的受激辐射截面。假定增益的变化小于增益的百分之一, 强度起伏的时间宽度小于往返时间, 积分可以简单地从起伏的开始处进行。(11) 式、(12) 式两端同时乘 $s(t)$ 后相加并在起伏范围内积分, 可以得到扰动放大的条件:

$$k \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt - \sigma g \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \int_{-\infty}^t s(t') dt' dt > 0 \quad (13)$$

上式可简化为:

$$\frac{k}{g} > \sigma \left[\int_{-\infty}^{+\infty} s(t) dt \right]^2 / \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt \quad (14)$$

$s(t)$ 包含在单程往返时间内, 积分在起伏范围内。积分限写成 $-\infty$ 到 $+\infty$ 是为了分析上的方便。又因为:

$$\left[\int_{-\infty}^{+\infty} s(t) dt \right]^2 / \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt = \beta \tau_p \quad (15)$$

式中 τ_p 为 $s(t)$ 的脉宽, β 为一个数值因子, 通常为 ~ 1 的量级, 例如对 sech^2 波形和高斯波形, τ_p 为脉冲的半高全宽(FWHM)时, β 分别为 0.85 和 0.75。于是由(11)~(15)式可以得到简单的自启动条件:

$$k/g > \beta \sigma \tau_p \quad (16)$$

由此可以看到, 增益介质的受激辐射截面是自启动的一个重要参数, 如附加主动锁模, 则可以引入一个较小的起始脉宽 τ_p , 易于附加脉冲锁模的启动。单纯附加脉冲锁模的启动, 只取决于随机产生的脉冲(或噪音或跳模), 并且受激辐射截面 σ 是起主导作用的因素。

4 实验装置

实验装置如图 2 所示。泵浦源是型号为 SDL-2324 的二极管列阵, 发光尺寸 $370 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, 通过温度调节使其发射的中心波长为 797 nm, 由一数值孔径(N. A.)为 0.8 焦距为 5 mm 的准直透镜、一焦距为 3.5 mm 的柱透镜和一焦距为 25 mm 的会聚透镜组成耦合系统, 各元件均镀对 797 nm 的增透膜, 耦合效率为 80%。聚焦透镜后焦面上的光斑尺寸为 $130 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 。

工作物质为 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 沿 c 轴切割的 Nd:YLF 晶体。棒的一端切成平面, 镀对 1.053 μm 高反、对 797 nm 高透的双色膜, 另一端切成布儒斯特角, 腔内只有波长为 1.053 μm 的 σ 偏振光起振。主腔采用三镜折迭像散补偿腔型。HR₁ 是曲率半径为 500 mm 对 1.053 μm

高反的球面镜，它的离轴工作用以补偿工作介质布儒斯特角引入的像散，HR₂、HR₃ 均是对 1.053 μm 高反的平面镜，主腔的输出耦合镜 OC 的透过率为 10%。主腔内棒到凹面镜的距离为 320 mm。凹面镜到输出耦合镜的距离 800 mm。为了保证主腔输出为圆对称的 TEM₀₀ 模，在凹面镜上需实现像散补偿，利用 ABCD 矩阵理论可求出凹面镜倾角全角为 12°。主腔的输出是通过分束器 BS 耦合到外腔，分束器对 1.053 μm 的光的反射率为 85%。在外腔中光通过 25× 的显微镜镜耦合到长为 1.1 m 芯径为 8 μm 的单模光纤，耦合效率为 60%。光纤与全反镜间的耦合通过另一 25× 的显微镜镜来实现。外腔的全反镜 HR₃ 安装在压电陶瓷微位移驱动器的压电陶瓷上，通过伺服反馈系统监测主腔功率来调节压电陶瓷上的电压控制端镜的位置，使功率稳定并保证被动锁模的自启动和锁模脉冲的产生。

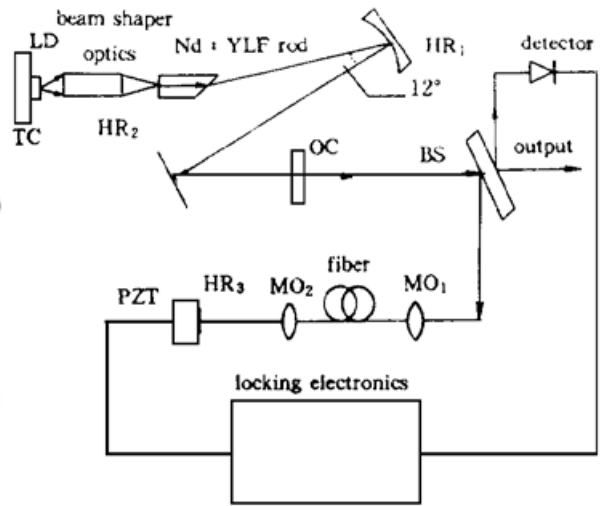


Fig.2 Schematic of self-starting additive pulse mode-locked diode-laser-pumped Nd:YLF laser. TC: temperature controller; LD: laser diode; OC: output coupler; HR: high reflector; MO: microscope objective; BS: beam splitter; PTZ: piezoelectric translator

5 结果与讨论

主腔在连续运转时泵浦阈值为 420 mW，在最大泵浦功率为 2.4 W 时 (指进入介质的功率) 输出 545 mW 的 TEM₀₀ 模，对应的光-光效率为 22.7%，斜效率为 27.4%。通过调节压电陶瓷的位置及配以合适的电压，系统可实现自启动锁模，连续锁模脉冲序列如图 3 所示，锁模阈值为 1.1 W，脉冲周期为 7.5 ns，对应的重复频率为 134 MHz，最大锁模有效输出功率为 76 mW，相应的峰值功率为 283 W。分别用扫描自相关仪和光栅仪测量脉冲宽度和带宽，结果如图 4 所示，脉宽为 Δτ = 2.0 ps，带宽为 Δλ = 0.86 nm，Δν = 225 GHz，时间带宽积为 ΔτΔν = 0.45，接近高斯脉冲的变换极限。

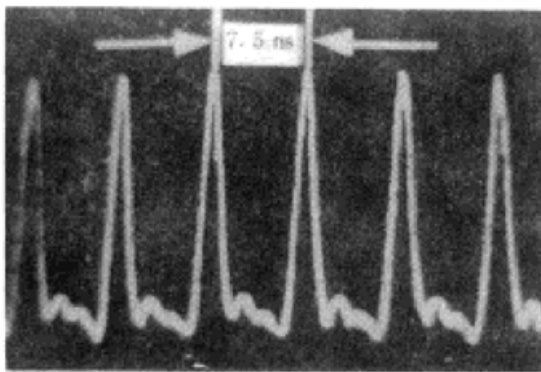


Fig.3 CW mode-locked pulse train with repetition rate of 134 MHz

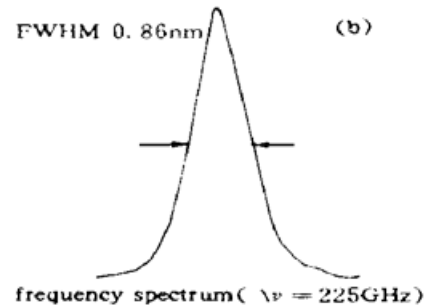
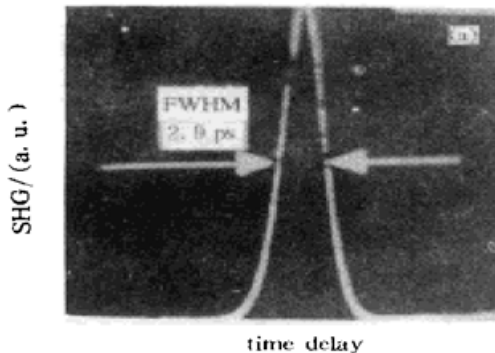


Fig.4 (a) Intensity auto-correlation trace of the output pulse of 2.9 ps, corresponding to a pulse duration of 2 ps, assuming a Gaussian pulse shape. (b) Frequency spectrum corresponding to the above pulse showing a FWHM of 165 GHz. SHG: second-harmonic generation

前面关于附加脉冲锁模自启动条件类似于基于快饱和吸收体的被动锁模, 起源于噪声起伏, 但是对附加脉冲锁模则有许多参数(如光纤长度、分束器的分束比率、及外腔中的损耗)可调, 使得自启动易于实现。有效输出功率可以通过降低分束器分束到光纤的比率来提高, 但需要加长光纤的长度以保证自启动的实现, 同时会导致脉冲加宽。

结 论 本文实现了二极管端面泵浦 Nd·YLF 激光器的自启动附加脉冲锁模, 获得了最高有效输出功率为 76 mW、脉宽为 2 ps、带宽为 165 GHz 波长为 1.053 μm 的变换极限脉冲。在整个系统调节最佳并保证环境稳定时, 可稳定工作。

感谢西安光机所的阎兴隆博士和杨鸿儒副研究员在本实验中提供的帮助和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state laser. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 895~ 912
- [2] S. Basu, R. L. Byer. Continuous-wave mode-locked Nd-glass laser pumped by a laser diode. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(6): 458~ 460
- [3] G. T. Maker, A. I. Ferguson. Mode locking and Q switching of a laser diode pumped neodymium-doped yttrium lithium fluoridelaser. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(5): 403~ 405
- [4] G. T. Maker, A. I. Ferguson. Frequency-modulation mode-locking of a diode pumped Nd-YAG laser. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 788~ 790
- [5] U. Keller, K. D. Li, B. T. Khuri-Yakub *et al.*. High frequency acousto-optic mode locker for picosecond pulse generation. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(1): 45~ 47
- [6] F. Krausz, T. Brabec, E. Wintner *et al.*. Mode lockng of of a continuous wave Nd-glass laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(23): 2386~ 2388
- [7] J. Goodberlet, J. Jacobson, J. G. Fujimoto *et al.*. Self-starting additive-pulse mode-locked Nd-YAG laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9): 504~ 506
- [8] G. P. A. Malcolm, F. F. Curley, A. I. Ferguson. Additive-pulse mode-locking of a diode-pumped Nd-YLF laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(22): 1303~ 1305
- [9] 阎兴隆, 常增虎, 任友来等. 二极管泵浦自启动附加脉冲锁模 Nd·YLF 激光器. *光子学报*, 1997, **26**(1): 27~ 30
- [10] 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
- [11] E. P. Ippen, H. A. Hans, L. Y. Liu. Additive pulse mode locking. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(9): 1736~ 1745

Diode End-Pumped Additive Pulse Mode Locked Nd·YLF Laser

Wang Chun Shen Xiaohua Chen Shaohe Deng Ximing

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

(Received 6 November 1997; revised 7 January 1998)

Abstract A diode-end-pumped Nd·YLF laser with self-starting additive pulse mode-locking is investigated, The mechanics of the pulse shortening and the condition of the self-starting are analyzed. When pumped with the maximum power of 2.4 W, stable CW mode locked trains of 2 ps pulses are generated at 1.053 μm , with an average effective output power of 76 mW, corresponding to a peak power of 283 W.

Key words diode-pumping, additive pulse mode-locking, self-starting.