

二极管泵浦自启动 附加脉冲锁模 Nd : YLF 激光器

阎兴隆 常增虎 任友来 杨鸿儒 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态室, 西安 710068)

摘 要 实现了激光二极管泵浦 Nd : YLF 激光器的自启动附加脉冲锁模, 工作波长 1053nm, 得到 2.8ps 的超短脉冲, 重复频率 130MHz, 有效输出功率 70mW.

关键词 二极管泵浦; 自启动; 附加脉冲锁模

0 引言

近些年由于宽带固体激光晶体和新的非线性锁模方法的出现, 使固体超短脉冲产生技术得到了迅速发展¹. 激光二极管作为泵浦源具有前所未有的优点, 如: 结构紧凑, 稳定性好, 寿命长等, 因此研制高效、高功率全固化的超短脉冲激光器是当前研究的热点之一. 商品化高功率 GaAlAs 激光二极管阵列其输出波长在 800nm 附近, 可与掺 Nd 激光晶体的吸收带极好匹配, 加上这类材料的高转换效率, 二极管泵浦 Nd : YAG²、Nd : YLF³ 等超脉冲激光器获得了极大成功, Nd : YLF 晶体非常适合二极管泵浦, 其吸收带宽比 Nd : YAG 宽, 泵浦波长的选择限制较松, 1053nm 的激光可做为掺 Nd 磷酸盐玻璃放大系统的振荡级, 它的荧光线宽是 Nd : YAG 的 3 倍, 阈值较低, 可做成比 Nd : YAG 性能更优越的超短脉冲激光器.

附加脉冲锁模 (APM)⁴ 是给原激光器主腔附加上一个非线性外腔, 使脉冲通过耦合腔中的非线性介质产生啁啾, 而后反馈到主腔与原无啁啾主脉冲相干叠加来得到有效的脉冲压缩. 这是一种全新的自启动锁模机理, 可适用于几乎所有的固体激光介质. 国际上二极管泵浦的 APM Nd : YLF 激光器获得了 1.5ps 的短脉冲⁵ (1047nm), 虽然后来发展起来的克尔透镜锁模技术⁶ 给固体激光器的超短脉冲产生开辟了一条新途径, 但由于其锁模阈值高, 无法自启动, 使其实用受到了限制. 因此, 发展 APM 技术仍有重要意义. 本文报道 3W 二极管泵浦 Nd : YLF 激光器的自启动 APM 实验研究, 得到了 2.8ps 的短脉冲, 工作波长 1053nm, 有效输出功率 70mW.

1 APM 基本原理

APM 激光器脉宽压缩机理已在文献 7 中详细讨论过, 这里只做如下简单分析. 图 1 是 F-P 干涉仪型的 APM 激光器简图. 图中, M_1 、 M_4 为高反镜, M_2 、 M_3 为部分反射镜, SPM 为自相位调制. 两腔只要有合适的相位关系, 系统的 CW 工作就会出现不稳定从而产生自启动的锁模, 这一过程起源于由弛豫振荡或模式拍频产生的最初的强度涨落, 这个初始扰动脉冲的一部分在增益腔内传播, 另一部分在外腔中传播, 得到自相位调制 (从而产生啁啾), 由如下非线性相移引起

$$\varphi_{nl} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L_{\text{eff}} \cdot n_2 \cdot I_t \quad (1)$$

中国科学院院长基金特别资助项目

收稿日期: 1996-03-22

式中 λ 为波长, L_{eff} 为光纤中的有效作用长度 (损耗较低时, L_{eff} 等于 2 倍光纤长度), I_t 是光纤内时间相关强度, 非线性系数 $n_2=3.2\times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$.

由于两腔具有相同的光程 (或整数倍), 两脉冲在各自腔内往返一周后在输出耦合镜上相遇, 若静态相移 φ 调节适当, 外腔中啁啾脉冲与主腔无啁啾脉冲相干叠加的结果是峰值处相长干涉、两翼处相消干涉, 从而导致脉冲的压缩, 这一过程经多次重复, 脉冲宽度可接近由介质增益带宽决定的极限. 为了保证在输出耦合镜上两个脉冲有准确的相位关系, 两腔长必须在干涉精度内相匹配, 因此, 使用一种伺服反馈电路来稳定腔长十分必要.

2 激光器结构

实验装置如图 2 所示, 泵浦源为 SDL 公司 3W GaAlAs 激光二极管阵列 (SDL-2342), 发光面积为 $370\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$. 波长可通过温度调节到 Nd:YLF 增益介质吸收峰 798nm. 为了准直高度发散的二极管激光输出光束, 首先使用一个数值孔径大于 0.5mm, 焦距为 5mm 的复合透镜来耦合二极管输出, 垂直方向得到准直. 为使水平方向也能准直, 泵浦系统还使用了一个焦距为 35mm 的柱面镜, 最后用焦距为 25mm 的球面透镜来聚焦至棒端. 所有元件均镀 798nm 增透膜, 耦合效率近 80%. 用 CCD 二维测量系统测得焦面上泵浦光斑大小为 $130\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ (强度的 FWHM).

增益介质为 $\varnothing 3\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的 Nd:YLF 晶体, a 轴平行于光束传播方向. 棒一端切成平面, 镀双色膜, 对工作波长 1053nm 高反, 对泵浦波长 798nm 高透 ($>95\%$). 另一端切成布儒斯特角, 抑制 π 偏振 ($E//C$) 1047nm 的激发, 而易于使 1053nm 跃迁 (σ 偏振, $E\perp C$) 优先在腔内起振. 主腔采用三镜折迭象散补偿腔型. 凹面镜曲率半径 500mm, 它的离轴工作用以补偿棒布氏角端面引入的象散.

外腔中包含有 1.1m 长的单模通讯光纤, 用两个 $25\times$ 显微镜来实现光纤耦合, 实验上耦合效率约 65%. 外腔腔长与主腔相匹配, 外腔全反镜安装在压电陶瓷微位移驱动器 (PZT) 上. 通过伺服反馈系统监测主腔功率和调节压电陶瓷所加电压来控制端镜位置, 使功率稳定在某一值, 从而保证自启动锁模和最短脉冲的产生, 内外腔构成 F-P 干涉仪型 APM 结构.

主腔设计的目的是能产生稳定的圆对称截面的 TEM_{00} 模输出, 这对提高外腔中光纤的耦合效率十分必要. 主腔内棒到凹面镜距离为 320mm, 凹面镜到输出耦合镜距离 800mm, 利用 ABCD 矩阵理论, 考虑到象散, 算得当凹面镜倾角全角为 12° 时, 在输出耦合镜上实现了象散补偿. 棒内光束强度 FWHM 在水平方向和垂直方向分别为 $230\mu\text{m}$ 和 $160\mu\text{m}$, 泵浦光可与之较好匹配.

3 结果与分析

当输出耦合镜透过率为 10% 时, 主腔实现 CW 运转的阈值泵浦功率是 430mW. 经测量输出功率由零到最大, 模式一直保持在稳定的 TEM_{00} 基横模, 为高效耦合入附腔光纤提供了保证. 不加附加腔时, 主腔输出最大功率 540mW, 最大泵浦功率为 2.4W, 对应光光转换效率达 23%, 斜率效率为 30%.

用一反射率为 85% 的分束镜, 将主腔输出耦合入非线性外腔, 外腔腔长是主腔 2 倍. 当泵浦功率

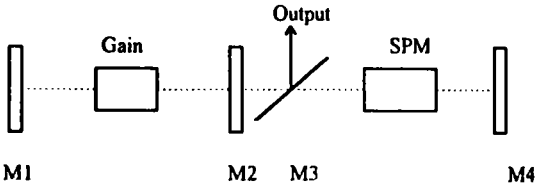


图 1 附加脉冲锁模原理图
Fig. 1 Schematic setup for additive pulse mode-locking.

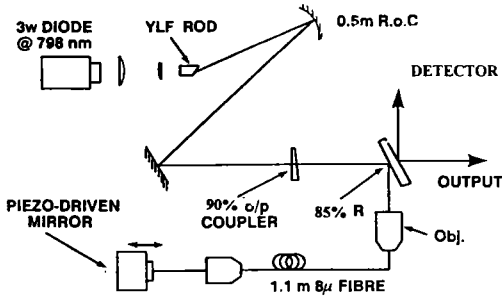


图 2 附加脉冲锁模 Nd:YLF 激光器结构
Fig. 2 Schematic of additive pulse mode locked Nd:YLF laser.

大于1.1W时,通过调节PZT位置,配以合适偏置电压寻找合适的工作点,系统即可实现自启动锁模.图3给出了示波器记录的CW锁模脉冲序列.脉冲周期7.5ns,对应重复频率130MHz,最大锁模有效输出功率70mW,对应单脉冲能量0.53nJ,图4显示主腔和锁模输出功率随二极管驱动电流的变化.

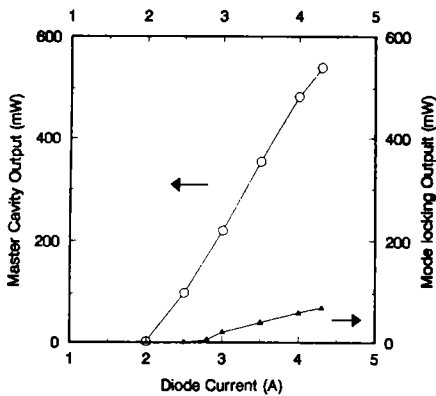


图3 CW锁模脉冲序列
Fig. 3 CW mode-locked pulse train from laser system.

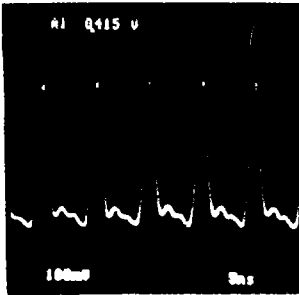


图4 激光器主腔及锁模平均输出功率
Fig. 4 Average power output of the primary cavity and APM laser.

当整个系统调节到最佳时,APM激光器可稳定工作近1h,但有时环境影响,如光学平台震动可对PZT反馈信号造成干扰,从而使锁模熄灭,但当敲击平台后,又可重新启动锁模,这是因为锁模过程起源于脉内噪音脉冲,敲击光学平台后即可改变腔内模式的相位,产生拍频,导致短脉冲的产生.另外实验发现,泵浦源输出功率的稳定,附腔光纤高耦合效率的保持,都对APM激光器的稳定运转有着极大影响.

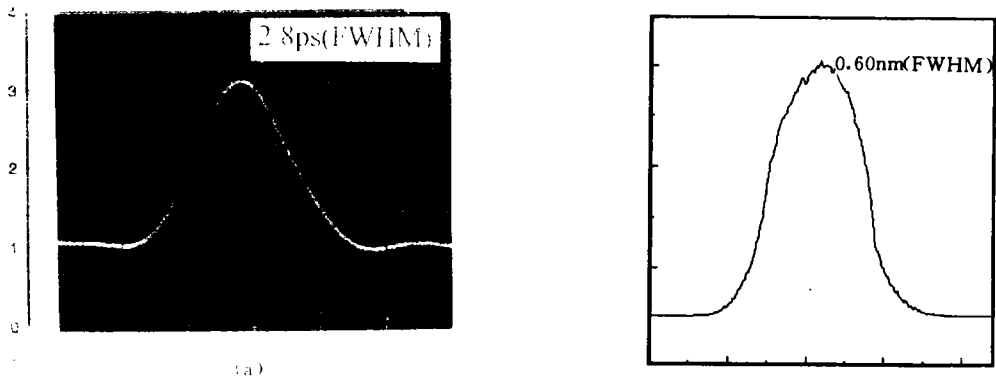


图5 APM激光器脉冲测量结果 (a) 脉宽 (b) 带宽
Fig. 5 APM laser pulse measurements from scanning autocorrelator and grating spectrometer (a) pulsewidth (b) bandwidth

分别用扫描自相关仪和光栅仪来测量脉冲宽度和带宽,典型结果如图5所示,脉宽 $\Delta\tau=2.8\text{ps}$,带宽 $\Delta\nu=160\text{GHz}$ ($\Delta\lambda=0.60\text{nm}$),时间带宽乘积

$$\Delta\tau \cdot \Delta\nu=0.448$$

(2)

接近高斯脉冲变换极限.

4 结论

本文实现了稳定的二极管泵浦Nd:YLF激光器的自启动附加脉冲锁模,获得了2.8ps的变换极

限脉冲, 最大有效输出功率 70mW. 实验表明这种激光器是一种理想的全固化皮秒脉冲源.

参考文献

- 1 Frausz F, Fermann M E, Brabec T, et al. Femtosecond solid-state laser. IEEE Quant Electr, 1992, QE-28 (10): 2097~2123
- 2 Marker G T, Ferguson A I. Frequency-modulation mode-locking of a diode-pumped Nd : YAG laser. Opt Lett, 1989, 14 (15): 788~790
- 3 Marker G T, Ferguson A I. Mode-locking and Q-switching of diode laser pumped neodymium-doped yttrium lithium fluoride laser. Appl Phys Lett, 1989, 54 (5): 403~405
- 4 Mark J, Liu L Y, Hall K L, et al. Femtosecond pulse generation in a laser with a nonlinear resonator. Opt Lett, 1989, 14 (1): 48~50
- 5 Malcolm G P A, Curley P F, Ferguson A I. Additive-pulse mode-locking of a diode-pumped Nd : YLF laser. Opt Lett, 1990, 15 (22): 1303~1305
- 6 Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-f sec pulse generation from a self-locked Ti: sapphire laser. Opt Lett, 1991, 16 (1): 42~44
- 7 Ippen E P, Hause H A, Liu L Y. Additive pulse mode locking. J Opt Soc Amer B, 1989, 6 (9): 1736~1745

LASER DIODE PUMPED ADDITIVE PULSE MODE-LOCKED Nd : YLF LASER

Yan Xinglong, Chang Zenghu, Ren Youlai, Yang Hongru, Hou Xun

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xian 710068

Received date: 1996-03-22

Abstract A diode pumped Nd : YLF laser has been passively mode-locked by using self-starting additive pulse mode-locking with a nonlinear optical fiber external cavity. Pulse durations of 2.8ps at 1053nm are generated at a repetition rate of 130MHz. The laser was pumped by a 3W laser diode array and had usable output power of 70mW, corresponding to a peak power of 190W.

Keywords Diode pumping; Self-starting additive pulse mode-locking

Yan Xinglong was born in 1965. He graduated from Xidian University in 1986 and obtained M. S & Ph. D degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics (XIOPM), Academia Sinica in 1989, in 1996 separately. His research interests include LD pumped solid state laser and generation of ultrashort laser pulse.

