

半导体激光泵浦预激光锁模调 Q 固体激光器研究*

陈有明 周复正 胡文涛 沈丽青 裘佩霞 朱三又 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 报道半导体激光侧面泵浦预激光锁模调 Q 的 Nd:YAG 固体板条激光器, 预激光锁模调 Q 的激光脉冲宽度(FWHM)为 36 ps, 调 Q 包络中心的锁模单脉冲能量超过 7 μ J, 相应的峰值功率达 200 kW。

关键词 半导体激光泵浦, 固体激光器, 锁模, 预激光调 Q。

1 引 言

锁模是产生超短脉冲极有效的技术之一。八十年代中后期, 高效、稳定、长寿命的半导体激光二极管(LD)的出现和发展, 使停滞了二十多年的固体激光器出现了勃勃生机。作为极为重要的固体激光技术——锁模技术, 成为人们研究热点之一。八十年代后期, 人们就研制成功了激光二极管泵浦的锁模固体激光器^[1, 2]。我国直到九十年代初期, 才相继开展半导体激光泵浦固体激光器的研究工作, 但研究发展速度很快, 在短短的三年时间里, 已成功地实现了声光调 Q、电光调 Q、色心和染料被动调 Q 激光输出。其中最大输出峰值功率已达 160 kW, 器件静态光-光转换效率和斜效率分别高达 22% 和 36.7%^[3]。本文所报道的是激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 板条激光器, 预激光锁模调 Q 的研究结果。

2 稳态锁模基本原理

均匀加宽增益的主动锁模理论以 Kuizenga 的理论最具权威性。根据 Kuizenga 的自治理论^[4], 可推及主动锁模脉冲的半功率宽度(FWHM)随锁模脉冲的建立时间有如下关系:

$$\tau_p(t) = \tau_0 / [\tanh(t/t_0)]^{1/2} \quad (1)$$

$$t_0 = \Delta f / 8g_0^2 \theta_m f_m^2 \quad (2)$$

$$\tau_0 \approx (\sqrt{2 \ln 2 / \pi}) (g_0)^{1/2} (1/f_m \theta_m \Delta f)^{1/2} \quad (3)$$

式中 τ_0 为稳态脉冲宽度, Δf 为激光介质增益线宽, f_m 为稳频调制器驱动频率, g_0 为往返饱和增益系数, θ_m 是锁模调制器调制深度的表征量。由(1)式还可进一步导出脉冲宽度随脉冲在腔

* 中国科学院军工“八五”重点课题。

收稿日期: 1994年6月9日; 收到修改稿日期: 1994年9月1日

内往返次数的变化关系:

$$\tau_p(M) = \tau_0 / [\tanh(M/M_0)]^{1/2} \quad (4)$$

$$M_0 = (1/4g_0^{1/2}\theta_m)(\Delta f/f_m) \quad (5)$$

就 Nd:YAG 增益介质而言, $\Delta f = 180$ GHz, g_0 取为 0.05, 实验的声光调制器驱动频率为 48 MHz, 图 1 给出了不同调制深度时, 脉冲宽度随激光脉冲在谐振腔内往返次数变化关系, 由此可以预测, 激光脉冲从初始噪声场到形成稳态锁模脉冲所需的循环次数, 当脉冲宽度以 5% 的误差接近稳态值时, 要求 $M > (0.38/4g_0^{1/2}\theta_m)(\Delta f/f_m)$ 。图 2 为不同调制器深度的条件下, 趋于稳态激光脉冲在腔内所需的循环次数, 由图 2 可知, 调制深度为 0.6 时, 相应的建立时间约为 48 μ s, 因此只有 200 ns 至 1 μ s 建立时间的调 Q 锁模的激光器, 其锁模脉冲是达不到稳态值的。

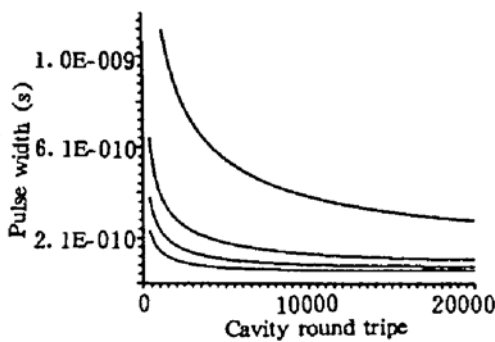


Fig. 1 Mode-locked pulse width versus the cavity round trips, with various modulation depth. (from top to bottom, modulation depth are 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 respectively)

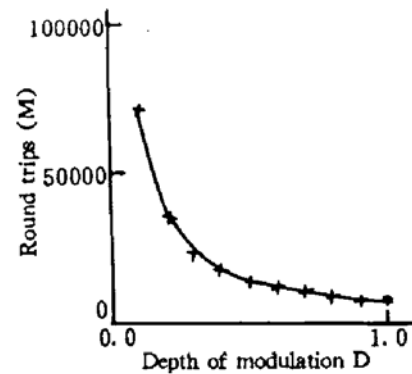


Fig. 2 The minimum round trips to converge to within 5% of the steady-state pulse width versus modulation depth

3 器件设计

为了获得高功率的近稳态锁模脉冲, 实验采用预激光锁模调 Q 方式, 使锁模脉冲有 100 μ s 以上的建立时间。同时还自行研制了大电流激光二极管驱动电源, 电流从 20 到 100 A 连续可调, 光泵宽度 100 μ s 至 500 μ s 连续可调, 并设计了高精度延时触发器, 保证预激光结束前可精确开启 Q 开关, 泵浦光源为准连续 60 W GaAlAs 半导体激光器, 控制温度使辐射的中心波长为 808 nm, 与 Nd:YAG 吸收波长匹配, 该激光器的发射区域 1 μ m \times 10 mm, 为此设计了 16.2 \times 2 \times 3 mm 的板条 Nd:YAG 与之相匹配, 并且该板条的两端面平行切割成布儒斯特角, 这种设计可增加泵浦耦合度和激射模式体积, 而且还可以减小增益介质端面光反馈量, 减少腔内的标准具效应。晶体的 Nd³⁺ 掺杂浓度为 1.1 wt%。采用侧面耦合泵浦方式, 为了提高晶体对泵浦光的吸收效率, 在晶体的另一侧贴附一块 808 nm 的反射镜。其装置如图 3 所示。实验采用小角度切割的熔融石英声光调幅锁模调制器, 附有温度控制调谐装置, 使得调制器工作在最佳功率匹配点。该调制器原为闪光灯泵浦的器件所设计, 其调制频率为 48 MHz, 相应的匹配腔长大于 1.5 m。对于有效增益长度约为 2 cm 的激光器而言, 无疑对谐振腔的结构有很高的要求。根据谐振腔理论, 利用 ABCD 矩阵对谐振腔进行了系统计算。全反射腔镜和输出腔镜的曲率半径分别选为 2 m 和 1.6 m 进行实验, 这样的谐振腔结构不仅 g 因子小 ($g = g_1g_2 = 0.016$) 而且还能满足稳定腔的条件 ($-2 < A + D < 2$)。研制了专用于二极

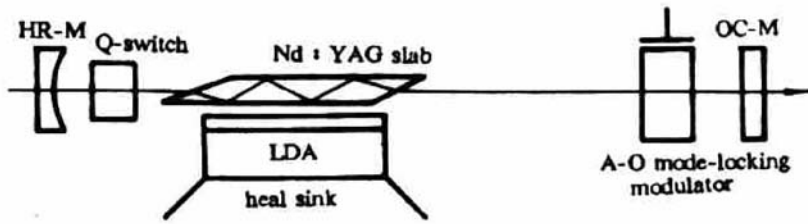


Fig. 3 Schematic of the pre-pulse Q-switched and mode-locked Nd:YAG slab laser side-pumped by a Q-cw 60 W laser-diode-array

管泵浦固体激光器(DPL)的小型、低耗、高效的重火石(ZF₆)声光调 Q 调制器。该调制器的输入、输出窗口均镀有 1.064 μm 的增透膜,以减少器件的插入损耗及光反馈量。调制频率为 80 MHz。由泵浦电源的延迟触发信号控制其开启时间,一般选在泵浦脉冲的末端打开调 Q 开关。

4 实验结果

首先进行了激光器静态实验,选用曲率半径为 1.6 m、透过率为 6.5% 的输出腔镜和曲率半径为 2 m 的全反射腔镜,成功地实现了激光器静态输出。泵浦阈值功率只有 20 W。靠近输出腔镜插入声光锁模调制器后,激光器的静态泵浦阈值功率增加到 30 W。精调匹配腔长,在锁模调制器驱动功率为 1 W 时,实验获得了良好的锁模脉冲序列,见图 4 所示。插入调 Q 开关后,静态泵浦阈值功率升至 36 W。当 Q 开关驱动功率加到 0.8 W 时,可抑制住泵浦功率达 58 W 时的激光振荡。选择 Q 开关驱动功率为 0.6 W,泵浦功率 50 W 为工作点。实验获得了预激光锁模调 Q 的激光输出。预激光锁模时间最长可达 250 μs(见图 5),调 Q 包络宽度为 400

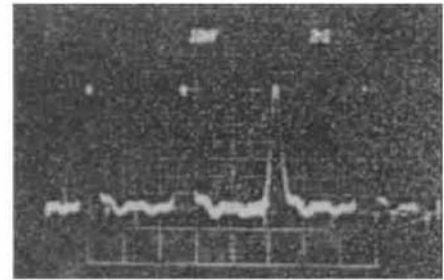


Fig. 4 Pulse chains of active mode-locked laser

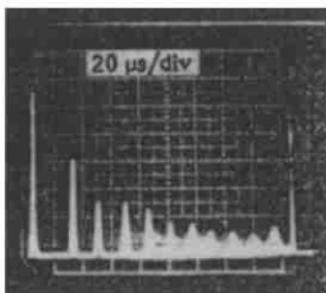


Fig. 5 Time trace of pre-pulse Q-Switched and mode-locked laser

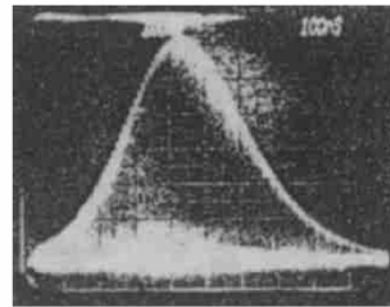


Fig. 6 Mode-locked laser pulse chain in a pre-pulse Q-switched pulse

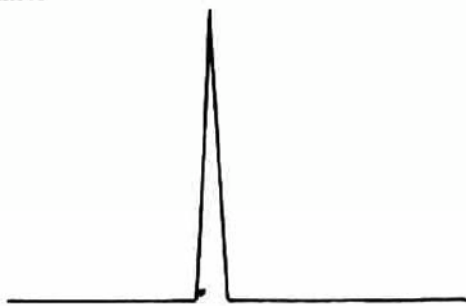


Fig. 7 Width of the pre-pulse Q-Switched and mode-locked laser pulse measured by a strip-camera

ns, 如图 6 所示。用自制的可在高重复频率(1 kHz)下使用的能量计(经北京物理所的 LPE-1A 能量计对标)测激光能量,发现预激光阶段与调 Q 包络的积分能量比为 3:5。调 Q 包络中心的锁模脉冲能量超过 7 μJ。脉冲宽度为 36 ps。相应的峰值功率大于 200 kW。图 7 为用分辨率 10 ps 的条纹相机测得的预激光锁模调 Q 的锁模脉冲时间波形。

5 结果分析

初步实验结果表明, 半导体激光泵浦的预激光锁模调 Q 激光器, 可以获得稳态锁模宽度的高质量锁模脉冲。与闪光灯泵浦的预激光锁模调 Q 激光器相比, 其锁模的脉冲宽度要窄得多。在近年来国外同类研究中, 也得到了相近的实验结果。但由于他们大多采用较高调制频率的锁模调制器, 因此基本上将此结果归结为 Kuizenga 方程(见(1)式)所预测的结果。作者认为对于一个有限带宽的激活介质, 并非调制频率越高越易获得窄的锁模脉冲, 因为调制频率越高, 模式间隔越大, 可锁定的频谱成份越少。因此存在一个最佳的锁模调制频率。从技术上讲用半导体激光器泵浦的固体锁模器件与闪光灯泵浦的没有大的原则区别。但从锁模机理上分析, 它却克服了闪光灯作为泵浦源所固有的负效应, 即较大的热效应和较强的光场噪声。动态热畸变会造成锁模脉冲的相位失谐。而要抑制大的光场噪声则需要更长的锁模建立时间, 这样又会带来更大的热负载。半导体激光器作为泵浦源, 其发射波长与激光增益介质吸收带中心吻合, 无用光谱成份一般小于 5%, 而且工作物质中无辐射跃迁所吸收的泵浦能量一般仅为吸收到总泵浦能量的 1/4 左右。半导体激光泵浦的固体激光器本身是一个有序到有序的过程, 其锁模脉冲形成的初始光场无规程度也小得多, 这就说明半导体激光泵浦的锁模固体激光器之所以能获得窄而高质量的锁模脉冲, 是由于它克服了闪光灯作为泵浦源在锁模机理上所存在的缺陷。

在整个实验过程中, 得到了林尊琪、竺庆春、李植森、范瑞瑛等同志的大力帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] S. Basu, R. L. Byer, Continuous-wave mode-locked Nd:glass laser pumped by a laser diode. *Opt. Lett.*, 1988, 13(6): 458~460
- [2] G. T. Maker, Mode-locked and Q-switched operation of a diode laser pumped Nd:YAG laser operating at 1.064 μm . *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53(18): 1675~1677
- [3] 周复正, 陈有明, 胡文涛等, 半导体激光泵浦固体激光器的新进展和应用前景. *中国激光*, 1994, 21(5): 354~360
- [4] D. J. Kuizenga, A. E. Siegmen, FM and AM mode locking of the homogeneous laser. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1970, QE-17(11): 694~715

Prelase Q-Switched and Mode-Locked Solid-State Laser Side-Pumped by a Laser-Diode-Array

Chen Youming Zhou Fuzheng Hu Wentao Shen Liqing
Qiu Peixia Zhu Sanyou Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 9 June 1994; revised 1 September 1994)

Abstract A pre-lase Q-switched and mode-locked Nd:YAG slab laser side-pumped by a quasi-cw 60 W laser-diode-array is described. The mode-locked pulse width of 36 ps is obtained. The energy within the 400 ns Q-switched pulse envelope is about 280 μJ , which gives a peak-power of over 200 kW.

Key words laser-diode-array pump, solid-state laser, mode-locking.