

激光二极管端面泵浦的 调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器

生卫东 刘宏伟 王 鹏 乔金元 李 昱 姚建铨

(天津大学精仪系, 天津 300072)

摘 要 报道了用两个 1.5 W 激光二极管偏振耦合端面泵浦的声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器。输出 532 nm 绿光重复频率 1 kHz 时, 最大峰值功率为 2.23 kW, 最窄脉宽为 18 ns, 平均功率 40 mW。最高重复频率 30 kHz。重复频率 15 kHz 时, 最高平均功率 128 mW。对声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器的动态特性进行了理论分析及计算。

关键词 激光二极管泵浦, 声光调 Q, 内腔倍频。

1 引 言

利用倍频技术, 实现绿光输出的二极管激光泵浦的 Nd:YAG 激光器在光存储、水下通讯等有广泛的应用前景^[1]。通过声光 Q 开关、腔内倍频, 可实现高重复频率、高峰值功率、窄脉宽的绿光输出^[2]。

本文采用两个输出功率为 1.5 W 的国产激光二极管, 经偏振耦合后, 端面泵浦声光调 Q、内腔倍频 YAG 激光器, 得到重复频率 1 kHz 时最大峰值功率 2.23 kW, 最窄脉宽 18 ns, 15 kHz 时最大平均功率 128 mW, 重复频率 1~30 kHz 可调的稳定绿光输出。从理论上对二极管泵浦的声光调 Q、内腔倍频 Nd:YAG 激光器的动态特性进行了计算及分析。

2 实验装置及结果

实验所用激光二极管为国产连续 1.5 W 单发光元激光二极管。为提高泵浦功率, 用两只二极管通过偏振棱镜耦合作为泵浦源。激光二极管发光面为 $1 \times 200 \mu\text{m}$, 利用温控装置将二极管输出波长调至 YAG 的吸收峰 808 nm 附近。二极管激光远场分布是非对称的, 在垂直于 P-N 结方向发散角 $\theta_{\perp} = 30^{\circ}$ (FWHM), 平行于 P-N 方向发散角 $\theta_{\parallel} = 6^{\circ}$ (FWHM), 远场能量都呈高斯分布。通过由二块柱面镜、二块双胶合球面镜组成的准直系统, 将两束二极管激光分别准直为偏振方向互相垂直的平行光, 经过偏振棱镜合为一束, 再利用一块双胶合透镜进行会聚, 端面泵浦声光调 Q、内腔倍频 Nd:YAG 激光器。实验装置台图 1 所示。

两束二极管激光经准直、偏振耦合、聚焦后, 焦点处最大功率为 1.55 W, 总耦合效率为 60%, 聚焦透镜 $f = 22 \text{ mm}$, 焦斑尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。

Nd:YAG 晶体为 $\Phi 3 \times 9 \text{ mm}$ 的圆棒, 掺杂浓度为 1.1%, 棒的一个端面镀双色膜(1.064

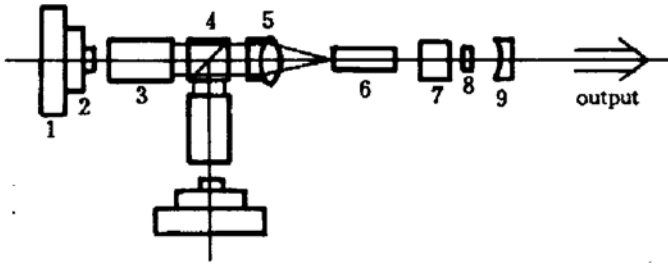


Fig. 1 Experimental setup for two laser diodes end-pumped Q-switched frequency doubled Nd:YAG laser

1: Temperature controller, 2: LD, 3: Collimating optics, 4: Polarizing prism, 5: Focusing lens, 6: Nd:YAG, 7: AO Q-switch, 8: KTP, 9: Output mirror

$1.064 \mu\text{m}$ 高反 $R > 99\%$, 808 nm 高透 $T > 98\%$) 作为谐振腔的全反镜, 另一端镀 $1.064 \mu\text{m}$ 增透膜 ($T > 99\%$), 输出镜为凹面镜, 镀双色膜 ($1.064 \mu\text{m}$ 高反 $R > 99\%$, 532 nm 高透 $T > 98\%$), 曲率 $R = 1000 \text{ mm}$ 。谐振腔长 $L = 150 \text{ mm}$ 。调 Q 元件为 ZnTe 声光晶体, 对 $1.064 \mu\text{m}$ 激光静态透过率 $T > 98\%$, 衍射效率 40% 。声光 Q 开关工作频率 40 MHz , 调制重复频率 $1 \sim 30 \text{ kHz}$ 可调, 调制脉冲上升沿小于 50 ns , 脉宽 $5 \sim 7 \mu\text{s}$ 。倍频晶体采用 KTP 晶体, 以 II 类匹配角度 ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 24.3^\circ$) 切割, 对

$1.064 \mu\text{m}$ 光倍频的有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 7.6 \text{ pm/V}^{[3]}$ 。

图 2 是泵浦功率为 1.2 W 时, 在不同重复频率下, 输出的 532 nm 绿光的峰值功率及脉冲宽度。由于 Q 开关驱动源温度升高, 最低重复频率由 1 kHz 漂至 1.5 kHz , 此时脉宽达到最窄为 20 ns , 峰值功率为 1.6 kW , 单脉冲能量为 $32 \mu\text{J}$ 。随着重复频率提高, 脉冲宽度逐渐增大, 峰值功率急剧下降。重复频率为 30 kHz 时, 脉冲宽度达 150 ns , 峰值功率只有 12.5 W 。泵浦功率达到最大值 1.55 W 时, 重复频率为 1 kHz 时绿光脉宽为 18 ns , 单脉冲能量为 $40 \mu\text{J}$, 峰值功率 2.23 kW 。

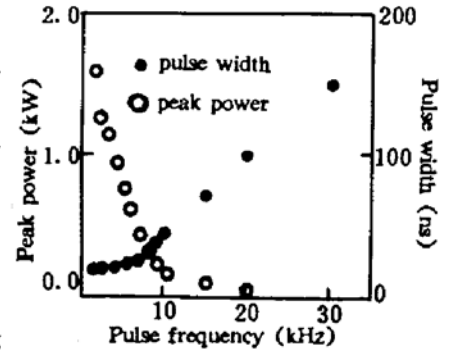


Fig. 2 The output peak power and pulse width of 532 nm laser versus the pulse repetition frequency

图 3 是重复频率为 15 kHz 时, 532 nm 绿光输出平均功率随泵浦功率变化曲线。泵浦功率 1.55 W 时, 绿光最大输出功率 128 mW , 光-光转换效率为 8.26% 。

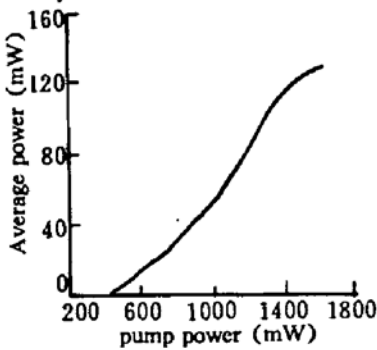


Fig. 3 The Q-switched average power of 532 nm laser at the repetition rate of 15 kHz versus the pump power incident into the YAG crystal

图 4 是泵浦功率为 1.2 W 、重复频率为 1.5 kHz 时, 用 100 MHz 示波器 (20 ns/div) 测得的 532 nm 绿光的脉冲波形。

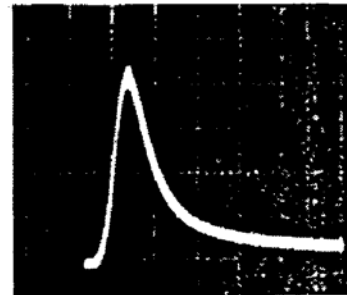


Fig. 4 Q-switched pulse trace of 532 nm laser (20 ns/div)

3 二极管泵浦的声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器的动态特性计算分析

分析激光器的动态特性时, 忽略泵浦光及振荡光的光强的空间分布以便于计算、分析。视倍频过程为随腔内基波光光子数变化的非线性损耗, 速率方程可写为^[4,5]:

$$\left. \begin{aligned} d\Delta n/dt &= R_p - \Delta n/\tau_f - c\Delta n\sigma S_1/n_s, \\ dS_1/dt &= c\sigma\Delta nS_1V_1/n_sV_R - c\delta S_1/2L - (cS_1/2L) \operatorname{th}^2(Bd\sqrt{S_1}), \\ S_2 &= S_1 \operatorname{th}^2(Bd\sqrt{S_1})/2, \\ \delta &= \delta_0 + \delta_Q. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, Δn 为基波光反转粒子数密度, S_1 为腔内基波光光子数密度, S_2 为腔内倍频光光子数密度, R_p 为泵浦速率密度, σ 为受激发射截面, τ_f 为荧光寿命, B 为非线性损耗系数, d 为倍频晶体长度, V_1 为增益介质内基波光模体积, V_R 为谐振腔内基波光模体积, n_s 为增益介质折射率, δ_0 为腔内由于衍射、反射、吸收等造成的往返损耗, δ_Q 为声光 Q 开关损耗参数, 当 $0 < t < t_c$, $\delta_Q = \delta_1$, 当 $t \geq t_c$, $\delta_Q = \delta_1 \exp(-2t/t_s)$, δ_1 为声光 Q 开关衍射损耗, t_c 为 Q 开关关闭时间, t_s 为 Q 开关时间特性参数, 分两步来分析调 Q 激光器的工作过程。

1) $t < t_c$, Q 开关关闭。腔内损耗 $\delta = \delta_0 + \delta_1$, 基波光反转粒子数密度得到积累, 急剧增大。腔内光子数密度很小, 忽略受激辐射、非线性损耗, 速率方程为:

$$\left. \begin{aligned} d\Delta n/dt &= R_p - \Delta n/\tau_f, \\ dS_1/dt &= c\sigma\Delta nS_1V_1/n_sV_R - c(\delta_0 + \delta_1)S_1/2L, \\ S_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2) $t \geq t_c$, Q 开关打开。Q 开关损耗迅速减小, 腔内光子数骤然增大。忽略泵浦和自发辐射, 速率方程为:

$$\left. \begin{aligned} d\Delta n/dt &= -c\Delta n\sigma S_1/n_s, \\ dS_1/dt &= c\sigma\Delta nS_1V_1/n_sV_R - c[\delta_0 + \delta_1 \exp(-2t/t_s)]S_1/2L - (cS_1/2L) \operatorname{th}^2(Bd\sqrt{S_1}), \\ S_2 &= S_1 \operatorname{th}^2(Bd\sqrt{S_1})/2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

设腔内基波光束的平均半径为 ω_s , 腔内基波光峰值功率为:

$$P_1 = \pi\omega_s^2 h\nu_1 c S_1.$$

倍频光输出峰值功率为:

$$P_2 = \pi\omega_s^2 h\nu_2 c S_2 T.$$

式中, ν_1 、 ν_2 分别为基波光及倍频光的频率, T 为输出镜对倍频光的透过率。

图 5 为数值计算得泵浦功率为 1.6 W、重频 1 kHz 时腔内基波光的调 Q 脉冲及输出倍频光的调 Q 脉冲波形。倍频光输出最高峰值功率 2.4 kW、脉冲宽度 14 ns, 腔内基波光最高峰值功率 25 kW、脉冲宽度 24 ns。

图 6 为数值计算得泵浦功率为 1.6 W 时, 倍频光的峰值功率及脉冲宽度随重复频率变化关系。重复频率由 1 kHz 到 30 kHz, 峰值功率从 2.4 kW 降至 63 W, 脉冲宽度由 14 ns 升至 67 ns。

结 论 本文对两个激光二极管偏振耦合端面泵浦的声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器进行了实验及理论研究, 计算与实验结果基本一致。

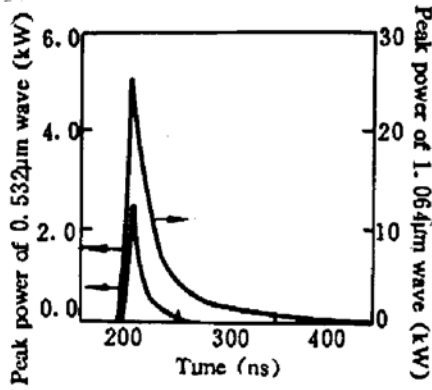


Fig. 5 Calculated pulse traces of fundamental and SHG wave in the resonator

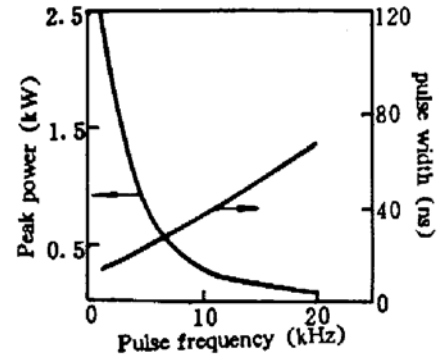


Fig. 6 Calculated peak power and pulse width of 532 nm laser as a function of pulse repetition frequency

致谢 本实验所用激光二极管由中科院半导体所肖建伟等同志提供, 声光 Q 开关由天津海洋技术所于连生等同志提供, 在此向他们表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. Burnham, A. D. Hays, High-power diode pumped frequency doubled cw Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1989, 14 (1): 27~29
- [2] Hamid Hemmati, James R. Lesh, High repetition-rate Q-switched and intracavity frequency doubled diode-pumped Nd:YAG laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, QE-28(4): 1018~1020
- [3] Jianquan Yao, Weidong Sheng, Weiqiao Shi, Accurate calculation of the optimum phase-matching parameters in three-wave interactions with biaxial nonlinear-optical crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, 9(6): 891~902
- [4] Ken'ichi Kubodera, Kenju Otsuka, Single-transverse-mode LiNdP₄O₁₂ slab waveguide laser. *J. Appl. Phys.*, 1979, 50(2): 653~659
- [5] 姚建铨, 薛 彬, 高转换效率下具有高斯及类高斯光束的内腔倍频. *光学学报*, 1985, 5(2): 142~150

LD End-Pumped Q-Switched Intracavity Frequency Doubled Nd:YAG Laser

Sheng Weidong Liu Hongwei Wang Peng Qiao Jinyuan
Li Yu Yao Jianquan

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 13 June 1994; revised 5 September 1994)

Abstract A Q-switched intracavity frequency doubled Nd:YAG laser end pumped by two polarization-coupled 1.5 W laser diodes is reported. The maximum peak power of 2.23 kW at 532 nm with the pulse width of 18 ns and the repetition rate of 1 kHz is obtained. The highest repetition rate is 30 kHz, and the maximum average output power is 128 mW for the 532 nm laser at repetition rate of 15 kHz. The dynamic characteristics of LD pumped Q-switched intracavity doubled Nd:YAG laser are studied theoretically.

Key words LD end-pump, AO Q-switched, intracavity frequency doubled.