

DH-LDA 泵浦 Nd:YAG 激光器腔内倍频

马建伟 周复正 沈小华 薛 强 张正泉
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

李振华 范琦康
(浙江大学光仪系, 杭州 310027)

提 要

用国产双异质结半导体激光列阵(DH-LDA 泵浦 Nd:YAG 激光器进行腔内倍频, 得到了 0.6 mW 的 532 nm 激光输出, 倍频效率为 2%; 进行了不同脉宽, 不同功率的高重复率泵浦实验, 利用位相延迟匹配技术, 得到了稳定的倍频激光输出. 分析计算了泵浦阈值, 与实验结果基本一致.

关键词 二极管激光泵浦, 腔内倍频.

1 引 言

最近, 用半导体激光泵浦固体激光器(DPL)得到了迅猛的发展^[1], 作为一种全新的全固态的器件, 它具有高转换效率、寿命长和稳定性高等优点. 其倍频可得相干蓝绿光等引起了人们的广泛兴趣. 大功率激光二极管列阵(LDA)与非线性耦合系数大的晶体, 如 KTP、BBO 和 NYAB 等的发展, 使得二极管激光泵浦固体激光器倍频得到了大幅度的提高, 国外已有 CW 1 W 和 Q-CW 3 W 倍频输出的报道^[2, 3]. 作者曾用国产的 GaAlAs/GaAs 半导体双异质结列阵激光器(DH-LDA), 泵浦 Nd:YAG 固体激光器, 得到了 1.06 μm 的激光输出^[4, 5].

本文报道用 KTP 作为倍频晶体, 进行腔内倍频, 得到了强度稳定的 532 nm 绿光输出.

2 实验结果

实验所用的光路如图 1 所示. 半导体激光器电驱动脉冲宽度可以调节, 最大脉宽为 400 μs , 重复率可变, 有 1 Hz, 100 Hz 和 1000 Hz 三种. 激光二极管列阵用半导体电热堆进行温控, 其中心激射波长为 807 nm, 与 Nd^{3+} 的 ${}^4I_{9/2}$ - ${}^4F_{5/2}$ 的吸收峰重合, 最大输出功率为 200 mW, 耦合系统采用显微镜系统, 耦合效率为 80%. 用二维 COD 测量激光二极管列阵经耦合系数后焦点处的场分布, 结果得到为双瓣分布总半宽为 $275 \times 39 (\mu\text{m})^2$.

Nd:YAG(Nd^{3+} 的浓度为 1 wt%)棒长 5 mm, 前表面为平面, 镀有对 1.06 μm 高反($R > 99.6\%$)膜, 对泵浦光 807 nm 高透($T > 90\%$)的双色膜, 作谐振腔的入射面. 棒的另一面

为曲率半径 $R \sim 50 \text{ mm}$ 的球面. 该面镀有对 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.532 \mu\text{m}$ 的高透膜, 球面起到腔内聚焦的作用, 使倍频晶体中的光束聚束, 从而提高非线性耦合系数. 倍频晶体为 KTfPO_4

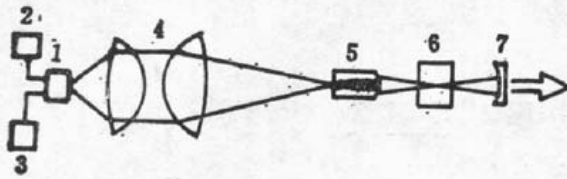


Fig. 1 The experimental apparatus of LD pumped intracavity frequency doubling.

1—Diode laser, 2—Driving power, 3—Heat sink, 4—Coupling system, 5—Nd:YAG rod, 6—KTP, 7—output mirror

(KTP)切割成第二类相位匹配的形式, KTP厚度为 6 mm , 两个平面均镀有对 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.532 \mu\text{m}$ 的高透膜, 前平面距 Nd:YAG 球面端 5 mm , 另一面距输出耦合镜 6 mm . 输出耦合镜 $R \sim 50 \text{ mm}$, 镀有对 $1.06 \mu\text{m}$ 高反 ($R > 99.6\%$) 和对 $0.532 \mu\text{m}$ 高透 ($T > 90\%$) 的膜. 这种谐振腔构成了 $1.06 \mu\text{m}$ 的低损和 $0.532 \mu\text{m}$ 的高损腔. 经过计算, 该谐振腔的 TEM_{00} 模的束腰大小为 $90 \mu\text{m}$, 在 Nd:YAG 前表面基模尺寸为 $100 \mu\text{m}$ 左右, 小于泵浦光经耦合系统后在棒表面的尺寸.

实验时, 先用重复率为 1 Hz 的驱动电流脉冲方式工作, 调腔至最佳位置, 使分离元件腔起振, 然后将倍频晶体放在束腰的位置, 得到了不稳定的绿光输出^[6]. 其不稳定的原因作者认为: 由于泵浦光与基模模式不匹配, 泵浦光束大于基模尺寸, 且为双瓣泵浦, 加上腔内没有布儒斯特窗或标准具等选腔模器件, 这样腔内振荡除了 TEM_{00} 模之外, 还有其它高级模振荡存在, 模与模之间通过倍频晶体而相互耦合, 造成了不稳定的绿光输出, 见实验波形图 2.

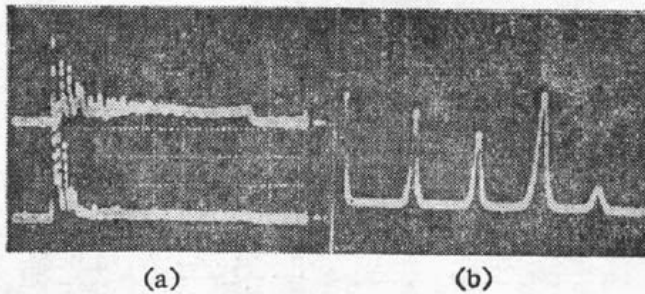


Fig. 2

(a) Relaxation oscillation at $1.06 \mu\text{m}$ (up) and $0.532 \mu\text{m}$ (down) ($\tau = 50 \mu\text{s/div}$, driving current $I = 700 \text{ mA}$). (b) Expanded relaxation oscillation of $1.06 \mu\text{m}$ ($\tau = 5 \mu\text{s/div}$)

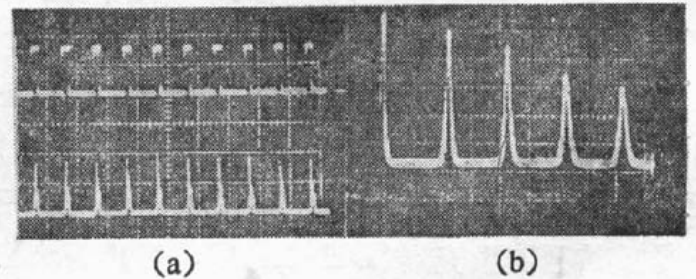


Fig. 3

(a) Stable output at high repetition of 1 kHz with short pulse ($\tau = 200 \mu\text{s}$) and lower pump power (Driving current $I = 320 \text{ mA}$). (b) Expanded relaxation oscillation of $1.06 \mu\text{m}$ ($\tau = 10 \mu\text{s/div}$)

为了得到稳定的绿光输出, 将泵浦方式改成高重复率 (1 kHz) 的脉冲泵浦. 改变泵浦脉冲的宽度和功率, 结果在高功率短脉冲泵浦方式下, 只能有基波的一个脉冲振荡 ($t \sim 20 \mu\text{s}$), 其脉冲的峰值与宽度起伏 $< 1\%$; 在弱泵浦长脉冲下, 腔内振荡可以是单模振荡, 结果在每个脉冲内能量稳定; 在一般泵浦情况下, 由于 Nd:YAG 和 KTP 均存在双折射效应, 而 Nd:YAG 的双折射效应较弱, 一般 $|n_f - n_s| \sim 3 \times 10^{-7}$, n_f 与 n_s 分别是快轴与慢轴对基波的折射率, KTP 的双折射效应较大, 其 $|n_f - n_s|$ 数值近似为 0.08 , 因此对 Nd:YAG 加上一定的压力, 提高 $|n_f - n_s|$ 的数值, 固定 Nd:YAG 不动, 转动 KTP 晶体, 利用位相延迟匹配技术^[7], 改变棒与 KTP 晶体的快轴之间夹角, 用加有绿色滤光片的光电二极管探测绿光的稳定性, 可以得到稳定的 2 W 绿光输出, 其实验所得波形如图 3 所示. 用灵敏功率计测得绿光平均输出功率为 0.6 mW , 倍频效率为 2% .

3 分析与讨论

下面简单地计算一下无倍频晶体时分离腔的阈值:

对于本实验中半导体激光纵向泵浦固体激光器, 泵浦焦斑为双瓣, 总半宽为 $275 \times 39 (\mu\text{m})^2$, 单瓣半宽为 $138 \times 39 (\mu\text{m})^2$, 考虑到腔结构, 对于单瓣泵浦, 可以假定泵浦光为椭圆高斯光束, 激光为圆对称高斯光束, 假定在单模条件下工作对于归一化的 TEM₀₀ 模^[8]

$$r_p(x, y, z) = \frac{\alpha}{[1 - \exp(-\alpha L)] \pi \omega_x \omega_y} \exp(-\alpha z) \exp[-(x^2/\omega_x^2) + (y^2/\omega_y^2)], \quad (1)$$

$$S_0(x, y, z) = \frac{1}{\pi \omega_0^2 L} \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_0^2], \quad (2)$$

$$\iiint r_p(x, y, z) d\tau = \iiint S_0(x, y, z) = 1 \quad (3)$$

式中 $r_p(x, y, z)$, $S_0(x, y, z)$ 分别为泵浦光和激光场的分布, α 为吸收系数, L 为棒长, ω_x , ω_y , ω_0 分别为泵浦光 x 方向, y 方向和激光束束腰的大小. 对于 Nd³⁺ 的 $1.06 \mu\text{m} \ ^4F_{3/2} \rightarrow \ ^4F_{11/2}$ 跃迁, 可以简化成四能级系统, 在速率方程近似下, 在阈值附近有

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_b(x, y, z)}{dt} = 0 = -[N_b(x, y, z)/\tau_f] + R f_b r_p(x, y, z), \\ R \sim \eta_c \eta_T \eta_P P_a / h\nu_p, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $N_b(x, y, z)$ 为上能级的粒子数, τ_f 为上能级的荧光寿命, f_b 为上能级的粒子数占据比, 在室温下为 0.6, R 为泵浦速率, $h\nu_p$ 为泵浦光子能量, η_c 为耦合系统的效率, η_P 为量子发光效率, 一般情况下 $\eta_P \sim 1$, η_T 为棒的前表面对泵浦光的透过率, P_a 为 Nd:YAG 的吸收功率. 在阈值条件下, 激光在腔内往返一次的增益应等于损耗 δ , 即

$$\iiint 2\sigma L S_0(x, y, z) \eta_c \eta_T \eta_P P_{th,a}^{cw} r_p(x, y, z) \tau_f / h\nu_p dV \equiv \delta, \quad (5)$$

式中 σ 为受激散射截面, 将(1)~(3)式代入(5)式解得连续波阈值条件下的吸收泵浦功率 $P_{th,a}^{cw}$ 及泵浦功率 P_{th}^{cw} 分别为

$$\left. \begin{aligned} P_{th,a}^{cw} &= \frac{\pi h\nu_p \delta}{2f_b \tau_f \sigma \eta_c \eta_T \eta_P} \sqrt{(\omega_0^2 + \omega_x^2)(\omega_0^2 + \omega_y^2)}, \\ P_{th}^{cw} &= \frac{P_{th,a}^{cw}}{1 - \exp(-\alpha L)}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对于脉冲工作方式, 则其关系为^[9]

$$P_{th}^p = P_{th}^{cw} [1 - \exp(-\Delta t / \tau_f)], \quad (7)$$

式中 P_{th}^p 为脉冲工作时阈值, Δt 为脉宽. 将实验数据代入(7)式, $w_0 \sim 90 \mu\text{m}$, $w_x \sim 70 \mu\text{m}$, $w_y \sim 20 \mu\text{m}$, $\sigma \sim 3.2 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, $\tau_f \sim 260 \mu\text{s}$, $\alpha \sim 4.9 \text{cm}^{-1}$ (α , σ , τ_f 引用文献中的数据), $\delta \sim 0.01$, $\Delta t \sim 400 \mu\text{s}$, 计算得到 $P_{th}^p \sim 16 \text{mW}$, 与实验中分离腔阈值 15mW 基本一致. 作者认为: 由于部分数据采用文献中的数据, 此外在分析计算中, 仅考虑到中心吸收谱的作用, 而实际的激光二极管阵列有一定的频谱宽度, 且为双瓣泵浦, 这就造成理论计算与实验结果的一定差异.

感谢方祖捷、金志良、屠玉珍、顾德英、封伟忠组提供 DH-LDA, 杨香春提供 KTP 晶体, 镀膜组范瑞瑛的大力协助。

参 考 文 献

- [1] R. L. Baer, Diode Laser-Pumped Solid-State Lasers. *Science*, 1988, **239** (2): 742~747
- [2] M. Oka, H. Masuda, Y. Kaneda *et al.*, Laser diode pumped 1-W cw green, laser. in *Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics* (Optical Society of America, Washington, D. C. 1990) paper CWC5
- [3] L. R. Marshall, A. D. Hays, R. L. Burnham, Stable, 3-W, cw-diode pumped laser at 0.532 μm . in *Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics* (Optical Society of America, Washington, D. C. 1991), paper CFC7
- [4] 周复正, 沈丽青, 范滇元等. 半导体激光泵浦 Nd:YAG 固体激光器. *激光杂志*, 1991, **12** (5): 225~229
- [5] Zhou Fuzheng, Shen Liqing, Fan Dianyuan *et al.*, Diode Laser-Pumped Solid-State Laser. *Sino-Japan Symposium on Lasers*, Shanghai, China, 1990, paper 8A4
- [6] T. Baer, Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1986, **3** (9): 1175~1190
- [7] G. E. James, E. M. Harrell II, C. Bracikowski *et al.*, Elimination of chaos in an intracavity-doubled Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15** (20): 1141~1143
- [8] T. Y. Fan, R. L. Byer, Diode-Laser-Pumped Solid-State Lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24** (6): 895~912.
- [9] G. I. Farmer, Y. C. Kiang, Low-current-density LED-pumped Nd:YAG laser using a solid cylindrical reflector. *J. Appl. Phys.*, 1974, **45** (3): 1356~1371

Intracavity frequency doubling of DH-LDA pumped Nd:YAG laser

MA JIANWEI ZHUO FUZHENG SHEN XIAOHUA XUE QIANG ZHANG ZHENGQUAN

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

LI ZHENHUA FAN QIKANG

(Department of Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 4 December 1991; revised 17 March 1992)

Abstract

Intracavity frequency doubling of a home-made DH diode laser array (DH-LDA) pumped Nd:YAG laser at wavelength of 0.532 μm was obtained. The green light output power was 0.6 mW with doubling efficiency 2%. The stable output of doubled light in the pump condition of different duration and power with high repetition rate was observed by using the method of phase delaying. The threshold was theoretically analyzed, which agreed well with the experimental results.

Key words diode laser pump, intracavity frequency doubling.