

文章编号: 1001-4322(2003)10-0963-03

高功率二极管泵浦腔内倍频激光器*

姚震宇^{1,2}, 吕百达¹, 高剑蓉², 童立新², 卓有福², 张雷², 蔡震²

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064;
2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 成功研制了一台高功率二极管泵浦声光 Q 开关腔内倍频 Nd: YAG 激光器。当泵浦功率约为 350W 时, 采用透过率为 30% 的输出耦合镜, 调 Q 激光输出功率 32.5W, 脉宽约 200ns, 重复频率 7kHz; 采用类匹配 KTP 晶体腔内倍频, 获得了 32.5W 的绿光输出, 脉宽约 120ns。输出光束平滑, 远场为类高斯分布, 测得的光束质量因子为 3.6。

关键词: 高功率; 二极管泵浦; 腔内倍频激光器

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

二极管泵浦腔内倍频激光器是一种非常有用的可见激光光源, 在许多领域都有非常广泛的应用, 如: 材料精密处理、干涉计量、泵浦可调谐钛宝石激光器、生物医学、光谱学、信息存储等。众所周知, 倍频效率随入射基波功率密度的增大而增大, 因此对连续波或高重复频率激光, 由于功率密度很低, 因而倍频转换效率非常低。将倍频晶体放入激光谐振腔内是解决这一问题的有效手段。但是, 在腔内插入倍频晶体后, 由于非线性过程中的纵模和频效应和交叉饱和, 将产生所谓的绿光问题^[1], 激光器的稳定性将大大变差。改进激光器设计, 减小这些非线性效应的影响可以显著提高激光器性能。20 世纪 80 年代以来, 随着 KTP, LBO 等新的非线性晶体的出现和二极管泵浦技术的发展以及绿光问题的研究, 腔内倍频激光器取得了非常显著的进展, 目前国内华北光电技术研究所获得了平均功率 68W 的声光调 Q 腔内倍频绿光输出, 光束质量因子约为 18^[2]; 国外已获得了平均功率超过 100W 的稳定的调 Q 脉冲绿光输出^[35], 光束质量因子约为 50。本文采用由半导体温控系统控温的类匹配 KTP 晶体开展了二极管泵浦腔内倍频激光器技术研究, 获得了较高光束质量的绿光输出。

1 声光调 Q 激光输出

实验中使用的高功率二极管激光泵浦模块采用 $\phi 6\text{mm}$, 掺杂浓度为 0.6% 的 Nd: YAG 棒。二极管激光器呈五重对称分布, 不经耦合系统直接对棒进行侧泵浦。激光棒套在通水冷却的石英玻璃管内, 二极管激光器与激光棒之间的距离设计既保证了二极管发射的激光被棒充分接收, 又保证了泵浦光在棒内的均匀分布。为部分补偿激光棒的热透镜焦距, 棒两端加工成 $R = 1\text{m}$ 的凹面。采用的声光 Q 开关可在 1 ~ 10kHz 范围内工作, 有效通光口径较小, 为 $\phi 2\text{mm}$, 插入损耗较大, 关断功率和调 Q 效率都较低。鉴于该声光 Q 开关的性能, 采用平凹稳定腔, 如图 1 所示, 腔长 780mm, 全反镜采用 $R = 4\text{m}$ 的凹面镜, 输出镜采用透过率 20% 的平面镜。根据测得的激光泵浦模块工作电流 16A 时激光棒的热透镜焦距, 由矩阵光学计算得到棒上的基模半径约为

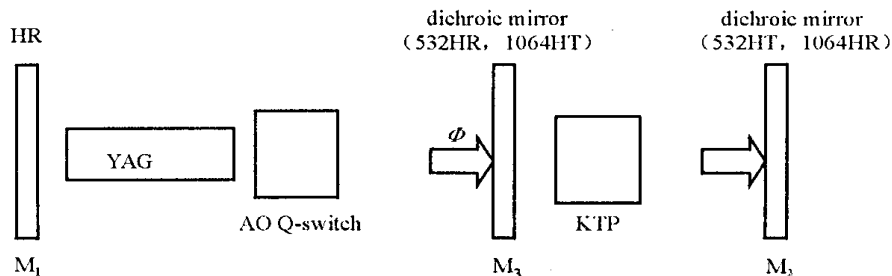


Fig1 AO Q-switched intracavity-doubled laser
图1 声光 Q 开关腔内倍频激光器结构示意图

* 收稿日期: 2003-01-23; 修订日期: 2003-06-27
基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金资助课题
作者简介: 姚震宇(1965-), 男, 博士研究生, 副研, 主要从事高功率二极管泵浦固体激光器研究; 绵阳市 919-1013 信箱。

0.82mm,输出镜上的基模光斑半径约为 0.27mm。

当泵浦模块工作电流 16A 时,泵浦功率约为 350W。在未插入声光 Q 开关之前,输出功率为 79.1W;插入声光 Q 开关和谐波反射镜(对 1.064μm,透过率大于 99%,对 0.532μm,反射率大于 96%)后,并在 Q 开关关闭的状态下,输出激光功率为 45.9W。输出功率下降较多是由于 Q 开关插入损耗较大及有效通光口径限模所致。在声光 Q 开关打开时,输出镜换成 30%透过率的平面镜,30%透过率为计算得到的最佳输出耦合。输出功率随重复频率的变化,如图 2 所示。当重复频率 7kHz 时,输出平均功率为 32.5W,脉宽约为 200ns。

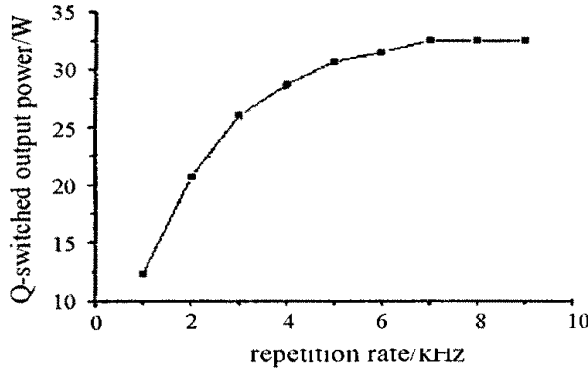


Fig. 2 Q-switched laser output vs repetition rate
图 2 调 Q 激光输出功率随重复频率的变化关系

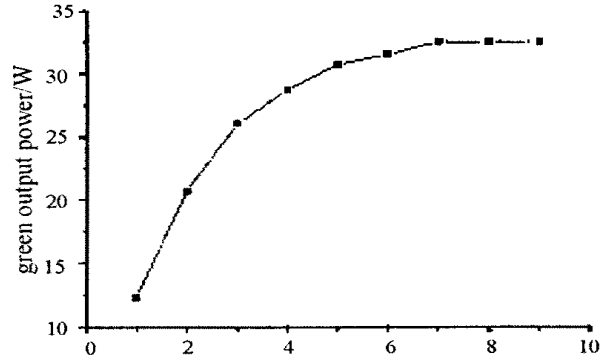


Fig. 3 Green output power vs repetition rate
图 3 绿光输出功率随重复频率的变化关系

2 腔内倍频

如图 1 所示,设计的腔内倍频激光器谐振腔采用直腔,输出镜为对基波 1.064μm 全反(反射率大于 99.8%),对谐波 0.532μm 高透(透射率大于 95%)的双色平面镜。为把腔内另一方向的倍频光同时输出腔外,插入对基波高透(透射率大于 99%),对谐波高反(反射率大于 96%)的谐波反射镜。采用类匹配 KTP 晶体进行倍频,倍频晶体工作温度 25℃,用半导体温控系统控温,致冷功率 5W。在泵浦模块工作电流 16A 时,控温良好;在 17A 时,KTP 晶体产生的热量约为 5.5W,超出了温控器的致冷功率,因此泵浦模块的工作电流设在 16A。可以将倍频过程看作一种随基波光子数变化而变化的非线性腔内损耗,则基波光子的速率方程可写为^[6]

$$\frac{dn}{dt} = W_p(n_0 - n) - B n - A n \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} = B n - (t) - S_{nl} \tag{2}$$

式中 n 为反转粒子数密度, n_0 为激活粒子数密度, n 为腔内基波光子数密度, W_p 为泵浦速率, B 为受激发射几率, A 为自发辐射几率, (t) 为声光 Q 开关及腔内其它损耗参数, S_{nl} 为非线性腔内损耗。

$$(t) = \alpha + \beta Q \tag{3}$$

式中: β 为 Q 开关损耗参数, α 为腔内其它损耗参数。Q 开关的开关函数为

$$Q(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_c \\ \exp\{-[(t - t_c)/t_s]^2\}, & t > t_c \end{cases} \tag{4}$$

式中: β 为 Q 开关的衍射损耗参数, t_c 为 Q 开关的开关关闭时间, t_s 为 Q 开关的开关时间常数。

对腔内的非线性损耗项 S_{nl} ,经推导得^[6]

$$S_{nl} = \frac{c}{2L} = \frac{0.769}{L} \times 10^8 \tanh^2(8.934 \times 10^{-8} l \sqrt{I}) \tag{5}$$

将(3),(4),(5)式代入方程(1),(2)就可得腔内基波光子数密度与泵浦功率、线性损耗、腔长 L 、倍频晶体长度 l ,Q 开关等有关参数的关系。根据泵浦模块工作在 16A 时泵浦功率、腔内线性损耗等参数,经计算得到最佳的倍频晶体长度约为 7mm。

实验中采用 8mm × 8mm × 7mm 的 KTP 晶体,绿光输出功率随重复频率的变化如图 3 所示。在重复频率为 7kHz 时,绿光输出 32.5W,脉宽约为 120ns。在不同的重复频率下,测得的绿光输出功率基本上与采用

30%透过率的输出镜测得的基波输出功率相等,说明这种情况下的倍频输出耦合对应于基波光的最佳输出耦合。在重复频率为 7kHz 时,采用 8mm × 8mm × 6mm 的 KTP 晶体,得到的绿光输出为 30.3W;采用 8mm × 8mm × 10mm 的 KTP 晶体,得到的绿光输出为 27.8W。

影响腔内倍频激光器稳定运行的主要问题是绿光噪声。研究表明^[78],腔内倍频激光系统的稳定性随腔内往返时间的延长和纵模数的增加而增强。另外,通过调节 YAG 和 KTP 晶体之间的相对角度,可以改变 YAG 棒和 KTP 晶体由于双折射而产生的相对相位延迟,从而使系统稳定运行。采用长谐振腔并仔细调节 KTP 晶体的角度,获得了稳定的调 Q 绿光输出,输出功率的稳定性约为 3%(rms)。采用美国 Spiricon 公司的 M²-200 测试仪测得的光束质量因子 M² = 3.6,光强分布如图 4 所示,输出光束平滑,远场为类高斯分布。

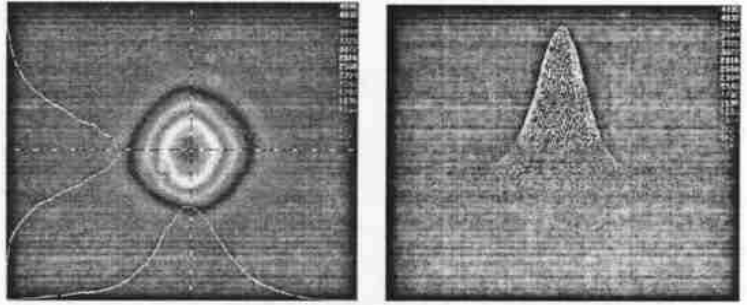


Fig. 4 Far-field beam profile of green output beam

图 4 输出绿光远场分布

3 结 论

成功研制了一台高功率二极管泵浦声光 Q 开关腔内倍频 Nd:YAG 激光器。受到声光 Q 开关性能和倍频晶体温控系统致冷功率的限制,高功率连续波激光泵浦模块设定在 16A 工作,对应的泵浦功率约为 350W,调 Q 绿光输出达到 32.5W,光-光效率接近 10%。目前正在对该系统进行改进,预计通过对声光 Q 开关、KTP 晶体温控系统的改造及谐振腔的优化设计,可以获得更高功率的稳定的调 Q 绿光输出。

致谢本研究得到了杨成龙研究员、唐淳和王卫民副研究员的指导、支持和帮助,在此深表感谢。

参考文献

- [1] Baer T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers [J]. *J Opt Soc Amer B*, 1986, 3: 1175 - 1180.
- [2] 姜东升,赵 鸿,王建军,等. 平均功率达 68W 的 LD 抽运倍频 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光,2002,A29(s0):102 - 104. (Jiang D S, Zhao H, Wang J J, et al. 68W green-beam operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2002,A29(s0):102 - 104)
- [3] Chang J J, Dragon E P, Ebberts C A, et al. An efficient diode-pumped Nd:YAG laser with 451 W of CW IR and 182 W of pulsed green output [Z]. OSA TOPS on Advance Solid-State Lasers, 1998, 19: 300 - 304.
- [4] Honea E C, Ebberts C A, Beach R J, et al. High average power diode-end-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser [Z]. OSA TOPS on Advance Solid-State Lasers 1998, 19: 305 - 309.
- [5] Konno S, Kojima T, Fujikawa S, et al. High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(2): 105 - 107.
- [6] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京:科学出版社,1995. 110—112. (Yao J Q. Nonlinear optical frequency conversion and laser tunable technology. Beijing: Science Press, 1995. 110—112)
- [7] James G, Harrell II E. Elimination of chaos in an intracavity-doubled Nd:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 1990, 15(20): 1141 - 1143.
- [8] Magni V, Cerullo G, Silvestri S, et al. Intracavity frequency doubling of a CW high-power TEM₀₀ Nd:YLF laser[M]. *Opt Lett*, 1993, 18(24): 2111—2113.

High power diode-pumped intracavity-doubled laser

YAO Zhen-yu^{1,2}, LU Bai-da¹, GAO Jian-rong², TONG Li-xin², ZHUO You-fu², ZHANG Lei², CAI Zhen²

(1. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-1013, Mianyang 621900, China)

Abstract: A high power diode-pumped Q-switched intracavity-doubled Nd:YAG laser has been developed successfully. A Q-switched laser output of 32.5W with 350W pumping power is obtained at 7kHz using a 30% output coupler. A green output of 32.5W is achieved with pulse duration of about 120ns using a type II KTP crystal. The output beam exhibits a smooth Gaussian-like profile in the far field and the beam quality factor is measured to be 3.6.

Key words: High power; Diode-pumped; Intracavity-doubled laser