

文章编号: 0258-7025(2003)06-0481-04

LD 抽运的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}-\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 组合单晶 自调 Q 激光器的研究

陈军¹, 葛剑虹¹, 周涛¹, 沈永行²

(浙江大学¹ 现代光学仪器国家重点实验室, ² 物理系, 浙江 杭州 310027)

摘要 用激光二极管(LD)连续抽运单体复合型 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}-\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 单晶微棒, 获得重复频率为 10 kHz, 脉冲宽度为 10 ns 的调 Q 激光输出。输出平均功率为 18 mW, 实验结果与理论计算的脉冲宽度和重复频率与抽运功率之间的关系基本相符。

关键词 激光技术; 组合掺杂 YAG 激光器; LD 抽运; 自调 Q

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

LD Pumped Combined Single Crystal $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}-\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ Self Q-switched Laser

CHEN Jun¹, GE Jian-hong¹, ZHOU Tao¹, SHEN Yong-hang²

(¹ State Key Lab. of Modern Optical Instrumentation, ² Physical Department,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Using the laser diode CW pumping $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}-\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ combined single crystal microcylinder, the self Q-switched laser pulses with the pulse width of 10 ns and the pulse repetition rate of 10 kHz are obtained. The average output power is 18 mW. Theoretical calculated pulse width and repetition rate vs pump power are agree with the experimental results.

Key words laser technique; co-doped YAG laser; LD-pumped; self-Q-switch

1 引言

LD 抽运的高重复频率、高功率、窄脉宽的激光器在微机械加工、测距、显微外科手术等方面获得越来越广泛的应用。近年来,有许多 LD 抽运的被动调 Q 激光器方面的研究^[1,2]。与染料, $\text{LiF}:\text{F}_2$ 色心晶体被动调 Q 相比,掺杂 Cr^{4+} 离子的晶体具有较大的吸收截面,饱和光强低,损伤阈值高等优点,以及光化学性能稳定,热导性好。作为被动调 Q 开关更为稳定。本文应用了一种新型的单体复合型 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}-\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 单晶光纤,在这种新型晶体中实现了自调 Q 激光运转。

2 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示,激光晶体为一种复合型 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}-\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 光纤,这是用激光加热基座法提拉生长而成的。其中晶体的一端为掺 Cr^{4+} 离子的 YAG,掺杂浓度为 0.2% (mol 比),以此为棒源,用掺 Nd 离子的 YAG 作为籽晶(掺杂浓度为 1.1% mol 比),提拉生长出复合型 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}-\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 单晶光纤。其直径 1 mm,总长度 8 mm。其中 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 长度约为 5 mm。另一端 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 长约 3 mm,其中约有 1~2 mm 的过渡区,区内掺杂浓度远低于棒端,所以实际上可用的饱和吸收体长度在 1 mm 以下。晶体圆柱呈光纤状,侧面为光滑

收稿日期: 2002-01-07; 收到修改稿日期: 2002-06-05

基金项目: 国家自然科学基金和中国工程物理研究院联合基金(编号: 10076015)资助项目。

作者简介: 陈军(1946.12—),女,浙江大学光电信息工程系教授,博士生导师,主要研究方向为激光与非线性光学。E-mail: chenjun1@moi-lab2.zju.edu.cn

表面,所以具有波导结构效应。在晶体的一个端面上镀了对 808 nm 的增透、对 1064 nm 高反的介质膜,使这一表面成为激光谐振腔的后腔镜。另外一个端面镀 1064 nm 增透膜。谐振腔的输出镜是一分立的凹面镜,对 1064 nm 反射率达 97%。实验中腔长为 10 mm。抽运光源为输出连续的 808 nm 激

光二极管。通过两个柱面透镜对 LD 快轴及慢轴的光束分别准直,再通过一个球面透镜汇聚到光纤内距前表面约 1 mm 处,耦合效率为 85%。调整抽运光位置及输出镜,获得了 1064 nm 自调 Q 激光脉冲输出。

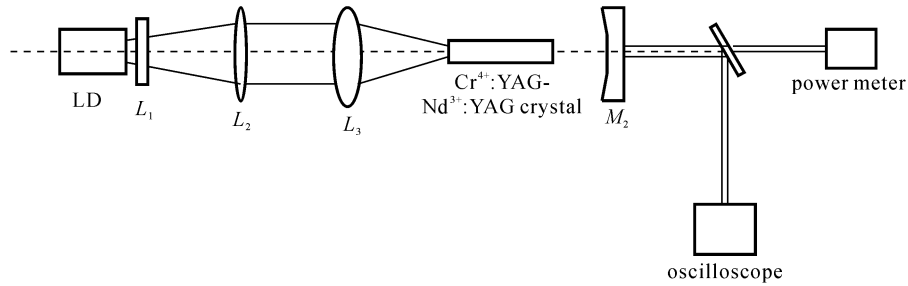


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Experimental setup

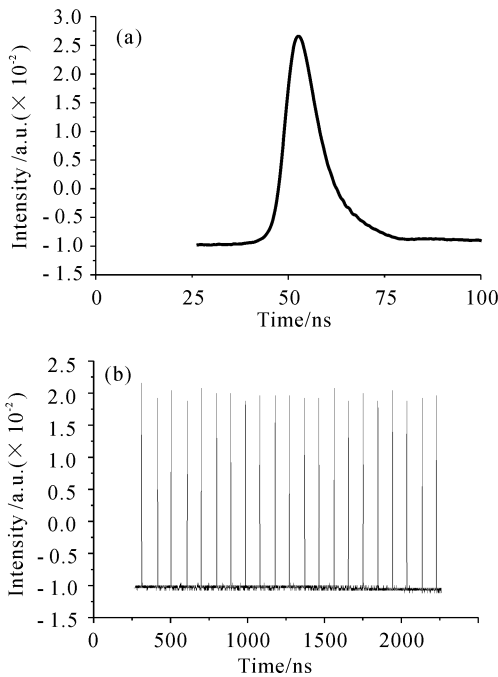


图 2 示波器显示的输出准连续激光脉冲形状
(a) 单脉冲脉冲宽度 10 ns; (b) 准连续脉冲间隔 100 μs
Fig. 2 Oscilloscope trace of the quasi-CW output laser pulses
(a) single pulse form with a FWHM duration of 10 ns;
(b) quasi-CW output laser with the pulse interval of 100 μs

实验中 LD 阈值抽运功率为 400 mW。当抽运功率加到接近 1 W 时,获得平均功率 18 mW,重复频率 10 kHz 的激光输出。图 2(a)为激光输出的脉冲形状,获得的单脉冲能量为 1.8 μJ,脉冲宽度为

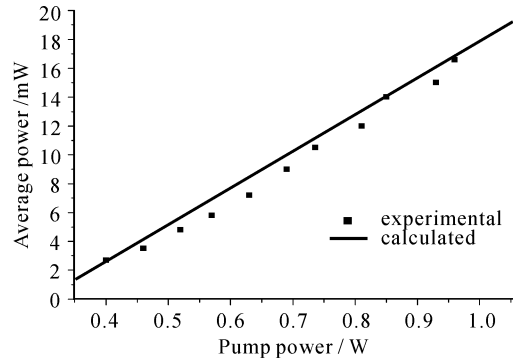


图 3 输出激光平均功率与 LD 抽运功率的关系
Fig. 3 Average power of output laser vs LD pump power

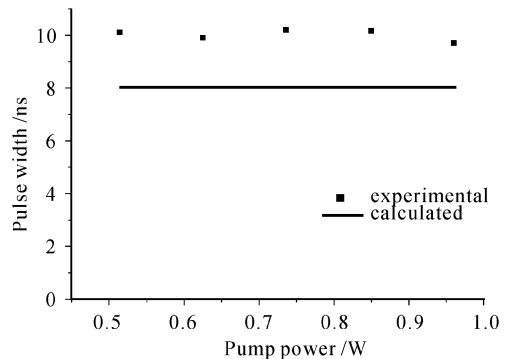


图 4 LD 抽运功率与输出激光脉宽的关系
Fig. 4 LD pump power vs output laser pulse width

10 ns,峰值功率达 180 W。图 2(b)为连续输出的激光脉冲序列,可以看到脉冲序列比较稳定。

图 3 表示输出的脉冲激光平均功率与 LD 连续抽运功率之间的关系。图中的实线是理论计算结果。

图 4 表示实验测量的 LD 抽运功率与输出激光脉冲宽度之间的关系。可以看出,增大抽运功率,对脉冲宽度影响不大。图 5 为抽运功率与输出激光脉冲重复频率之间的关系。实验结果表明,重复频率随抽运功率的增加成线性增长。同时测得增大 LD 抽运功率时,输出激光的单脉冲能量几乎不变。

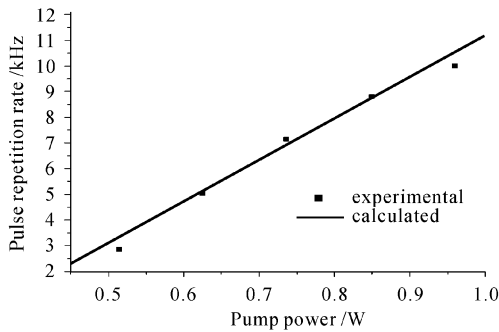


图 5 LD 抽运功率与输出激光重复频率的关系

Fig. 5 LD pump power vs output laser repetition rate

3 实验结果分析

调 Q 的激光输出特性可以通过速率方程求解获得^[3,4],而以可饱和晶体 Cr⁴⁺:YAG 作被动调 Q,则要考虑到可饱和晶体的基态和激发态对于光子的吸收,通过改写速率方程并求解,获得复合型 Cr⁴⁺:YAG-Nd³⁺:YAG 单晶光纤激光器的输出特性。被动调 Q 单脉冲能量、峰值功率可由下式求得^[5]

$$E = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (1)$$

$$P_{\max} = \frac{h\nu A l}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left[n_i - n_t - n_{t0} \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) - (n_i - n_{t0}) \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{n_t^c}{n_i^c}\right) \right] \quad (2)$$

其中, $h\nu$ 为单光子能量, A 为腔内激光的有效截面积, l 为增益介质的有效长度,考虑到只有抽运光焦点前后很小范围内的抽运光能达到抽运阈值之上,实际上有效的增益长度在 2 mm 左右。饱和吸收体 Cr⁴⁺:YAG 的初始反转粒子数 n_i , 残余反转粒子数 n_f 以及腔内光子数为最大时的反转粒子数 n_t 都可以通过增益介质的发射截面 σ , 饱和吸收体的基态吸收截面 σ_{13} , 受激态吸收截面 σ_{24} , 饱和吸收体的能级粒子数密度 n_{s0} 及其有效吸收长度 l_s , 谐振腔输出

镜的反射率 R 以及腔内其他损耗因子 L 计算出来^[5]。其中, $R = 0.97$, $L = 0.02$, 反转因子 $\gamma = 0.7$, 考虑到 Cr⁴⁺:YAG 的生长过程,实际上达到 0.2% 掺杂的区域只有 0.5 mm 左右,所以 $l_s = 0.5$ mm。(2) 式中的 $t_r = 2l'/c$ 为光束环腔传输时间, $\alpha = \sigma_{13}/\sigma\gamma$ 为饱和吸收体的吸收系数, n_{t0} 是一个常数,它可以认为是当系数 α 趋近于无穷大时的 n_t 值。腔内光束的有效截面积 A 可以根据实验测量得到的阈值抽运功率 P_{pth} 来确定。根据抽运光阈值功率表达式^[6]: $P_{\text{pth}} = h\nu_p A p l' \delta / \eta_F \sigma \tau l$, 实验测得阈值抽运功率 $P_{\text{pth}} = 0.3$ W, 填充效率 $\eta_F = 1$, 腔内的单程损耗 $\delta = \ln(R) + \sigma_{13} n_{s0} l_s + L$ 。求得抽运有效区半径为 54 μm , 小于由腔长 $l' = 16.5$ mm 和输出镜曲率半径 $\rho = 250$ mm 求得的激光束腰 145.1 μm 。所以腔内光束的有效半径应该取 54 μm , 此时有效面积 A 为 9.2×10^{-9} m²。按照以上参数利用式(1), 得到输出激光平均功率与 LD 抽运功率的理论关系如图 3 所示。

调 Q 输出的激光脉宽可以通过能量 E 和瞬时功率极大值 P_{\max} 的比值求得

$$\tau = \frac{E}{P} =$$

$$\frac{l' \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right)}{\sigma c l \left[n_i - n_t - n_{t0} \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) - (n_i - n_{t0}) \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{n_t^c}{n_i^c}\right) \right]} \quad (3)$$

根据晶体参数^[5] 求出单脉冲能量为 1.56 μJ , 峰值功率为 313 W, 脉宽为 5 ns。其中单脉冲能量理论值和实验结果较为相符。而脉宽理论值比实验结果小一半左右。其原因可以分析为,在以上理论中用到的速率方程是建立在腔内光子数和粒子数均匀分布的基础上,而实际情况中,由于抽运光的聚焦效果,光束边缘处的功率小于中心处功率。由反转粒子数差别与可饱和吸收的差别造成抽运光束边缘处与中心处所激励的激光脉冲形状及延时不同,从而造成脉冲展宽。通过数值计算对抽运光斑径向不同光强点激发脉冲进行叠加,得到 LD 抽运功率与输出激光脉宽的关系如图 4 中的直线所示。脉冲宽度理论值为 8 ns, 与实验结果基本相符。

重复频率与抽运速率的关系可表示为^[5]

$$f = \left[\tau_a \ln \frac{1 - n_i \beta / B \tau_a}{1 - n_i / B \tau_a} \right]^{-1} \approx \frac{B \tau_a / n_i - (1 + \beta) / 2}{\tau_a (1 - \beta)} \quad (4)$$

其中 B 为上能级的抽运速率, $\tau_a = 230$ μs , 为增益介

质的荧光寿命, β 为一常数, 它由 $\beta = 1 - f_a(1 - nf/ni)/\gamma$ 确定, 其中 $f_a = 0.41$ 。由 Degnan 的理论^[4], 上能级的抽运速率 B 和抽运功率值以及饱和吸收体的吸收有关, 可以表示为

$$B(r, z) = \frac{T_p \eta_p f_a \alpha_p}{h\nu_p} \frac{P_p}{A_p} e^{-\alpha_p z} e^{-2(r^2/w_p^2)} \quad (5)$$

其中 P_p 为抽运光功率, α_p 为增益介质对抽运光的吸收系数, $h\nu_p$ 为抽运光单光子能量, A_p 为抽运光的有效截面积, 在束腰处为 $\pi w_p^2/2$, 其中 w_p 为束腰半径。常数 T_p 和 η_p 近似为 1。那么用抽运光在晶体内的聚焦点处的平均上能级抽运速率近似代替 B , 可以得到重复频率和抽运功率的近似公式

$$f \approx (1 - e^2) e^{-\alpha_p z_p} \frac{\tau_a f_a \alpha_p}{2n_i h\nu_p A_p} P_p - \frac{(1 + \beta)/2}{\tau_a (1 - \beta)} \quad (6)$$

图 5 中实线为用以上理论计算的 LD 抽运功率与输出激光重复频率的关系。其线性关系与实验结果极为接近。

从理论计算中可以看到, 在被动调 Q 状态下的激光输出的脉宽主要取决于晶体中的 Cr^{4+} 粒子的掺杂浓度, 单脉冲能量和峰值功率则和增益介质的体积等因素有关。单纯地增加抽运能量只能促使调 Q 开关更迅速地开合, 从而提高重复频率以及相应的平均输出功率, 而单脉冲能量与脉冲宽度几乎不变。这正是被动调 Q 的特征。

4 结 论

利用 LD 连续抽运单体复合型 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ -

$\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 单晶光纤, 获得了 1064 nm 的准连续调 Q 激光脉冲输出。抽运阈值 400 mW, 脉冲宽度 10 ns, 重复频率随抽运功率的增长而成线性增长。当抽运功率为 960 mW 的时候, 获得了平均功率为 18 mW, 重复频率为 10 kHz 的激光输出, 单脉冲能量为 1.8 μJ 。根据理论计算可以预见, 加大抽运功率, 提高激光模体积同时避免损伤激活介质, 可以达到较高的输出功率及高重复频率。而通过改变掺杂浓度以及掺杂长度, 可以得到预定设计的脉冲宽度。

参 考 文 献

- 1 Jun Dong, Peizhen Deng, Yutian Lu *et al.*. Laser-diode-pumped Cr^{4+} , $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ with self-Q-switched laser output of 1.4 W [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15):1101~1103
- 2 B. Braun, F. X. Kärtner, G. Zhang *et al.*. 56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(6):381~383
- 3 John J. Degnan. Theory of the optimization coupled Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2):214~220
- 4 John J. Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11):1890~1901
- 5 Xingyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang *et al.*. Optimization of Cr^{4+} doped saturable-absorber Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(12):2286~2294
- 6 Bingkun Zhou. The Principle of Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984. 212~215 (in Chinese)