

大功率 LD 抽运 Nd·YVO₄/KTP 声光调 Q 绿光激光器*

李 健* * 卢兴强 侯 玮 许祖彦

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

提要 用大功率半导体激光器(LD)连续抽运 Nd·YVO₄/KTP 激光器,实现了声光调 Q 绿光输出,在注入抽运光功率 6.3 W,重复频率 25 kHz 时,获得脉冲宽度为 60 ns,平均功率为 1.76 W 的绿光输出,光-光转换效率达到 27.9%,绿光单脉冲能量为 70.4 μJ,脉冲峰值功率达到 1.17 kW。

关键词 全固态,声光调 Q,高重复频率

1 引 言

近年来,LD 抽运的全固态激光器(DPL)倍受关注,发展极为迅速,LD 抽运的大功率全固态绿光激光器更是当前比较前沿的研究课题。Nd·YVO₄ 晶体由于具有较宽的吸收带和较大的受激发射截面,特别适用于 LD 端面抽运的全固态激光器,已被经常用于大功率全固态激光器中^[1~5]。连续抽运的声光调 Q 激光器是获得高峰值功率和高重复频率激光的一种有效手段,由于调 Q 产生的激光脉冲具有峰值功率高的特点,调 Q 激光器腔内倍频是获得高转换效率、高功率谐波输出的一种重要途径。闪光灯抽运的声光调 Q 激光器已广泛应用于激光遥感、测距、雷达、光电对抗、激光加工、光通讯、医疗和科研领域,采用 LD 抽运的声光调 Q 激光器,可进一步提高器件的效率、稳定性和使用寿命,更可以实现器件的小型化和实用化。

国际上对 LD 抽运 Nd·YVO₄ 调 Q 脉冲激光器的研究比较热门,调 Q 方式从电光、声光 Q 开关的主动调 Q 到可饱和吸收体的被动调 Q 都有报道^[6~9],一般大功率 LD 抽运调 Q 绿光激光器均采用 Nd·YAG 晶体^[10~13],文献[4]报道了关于大功率 LD 抽运 Nd·YVO₄ 声光调 Q 脉冲绿光激光器的最新进展^[14],采用三明治腔结构进行了 LD 抽运 Nd·YVO₄/KTP 调 Q 绿光激光器的实验研究,在抽运光注入功率为 17 W,重复频率为 50 kHz 时输出绿光平均功率为 4.6 W,光-光转换效率为 27%。我们利用大功率 LD 抽运 Nd·YVO₄ 晶体,采用 V 型谐振腔设计,KTP 腔内倍频,研究了声光调 Q 绿光激光器的抽运阈值、绿光输出平均功率、重复频率、脉冲宽度等参数之间的关系及特性,得到了 27.9% 的光-光转换效率。采用 V 型谐振腔可以得到比直腔型的三明治腔更高的倍频效率,获得较高的转换效率。

* 国家高技术研究发展计划重大项目资助。

* * 山东师范大学物理系现代光学实验室。

收稿日期: 1999-07-16; 收到修改稿日期: 1999-08-30

2 实验装置

图 1 为实验装置示意图, 谐振腔采用 V 型折叠腔, 谐振腔总长度约为 260 mm。抽运源 LD 为 SDL 公司生产的 SDL-3540-P5 型带光纤耦合输出的半导体激光器, 中心波长 808 nm, 最大

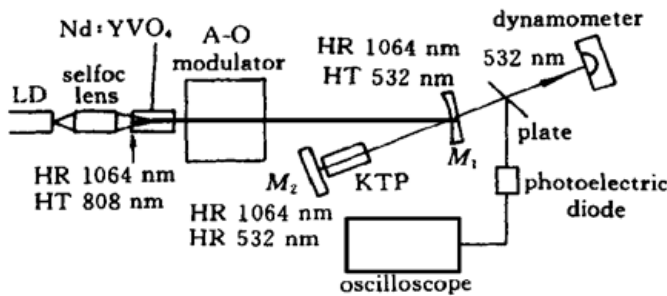


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

输出功率 10 W, 光束在光纤出口处的发散角为 48° (全角)。Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, 通光长度为 5 mm, Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.7 at.-%, 靠近抽运光的通光面兼作腔镜, 表面镀 1064 nm 高反和 808 nm 高透介质膜, 另一通光面镀 1064 nm 高透膜。声光调制器在腔内靠近 Nd:YVO₄ 晶体放置, 声光调制晶体为 ZF₆ 玻璃, 声光作用长度 36 mm, 一级衍射效率为 80%, LiNbO₃ 声光换能器的超声频率为 40 MHz, 调制重复频率在 1~30 kHz 可调, 调制脉冲上沿 < 50 ns, 调制脉宽 5~7 μs。折叠腔镜 M₁ 兼作绿光输出镜, 曲率半径为 100 mm, 表面镀 1064 nm 高反和 532 nm 高透介质膜。KTP 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm, 通光面均镀 1064 nm 和 532 nm 高透膜。谐振腔端镜 M₂ 为平面反射镜, 表面镀 1064 nm 和 532 nm 高反膜。

抽运光采用微型自聚焦透镜进行聚焦, 通光口径为 $\phi 2$ mm, 通光长度为 5.22 mm, 数值孔径 N.A. = 0.46, 对抽运光的传输效率为 83%。

实验中用铝板反射绿光, 用型号为 DET2-SI DC-350MHz 的硅快速光电二极管接收调 Q 绿光脉冲信号, 用型号为 VP-55530B 的 300 MHz 示波器观测脉冲的脉宽 Δt 及重复频率 F , 用 LP-2 型功率计测量激光输出平均功率 P_{aver} , 利用公式 $E = P_{\text{aver}}/F$ 和 $P_{\text{peak}} = E/\Delta t$ 即可计算出单脉冲能量 E 和脉冲峰值功率 P_{peak} 。

3 实验结果

在抽运功率不变的条件下, 改变调 Q 重复频率, 对绿光输出平均功率和调 Q 脉冲宽度进行了测量, 结果如图 2(a) 所示, 在重复频率为 25 kHz, 注入抽运光功率为 6.3 W 时得到平均功率为 1.76 W 的绿光输出, 脉冲宽度为 60 ns。实验结果表明, 在相同的抽运功率下, 绿光输出

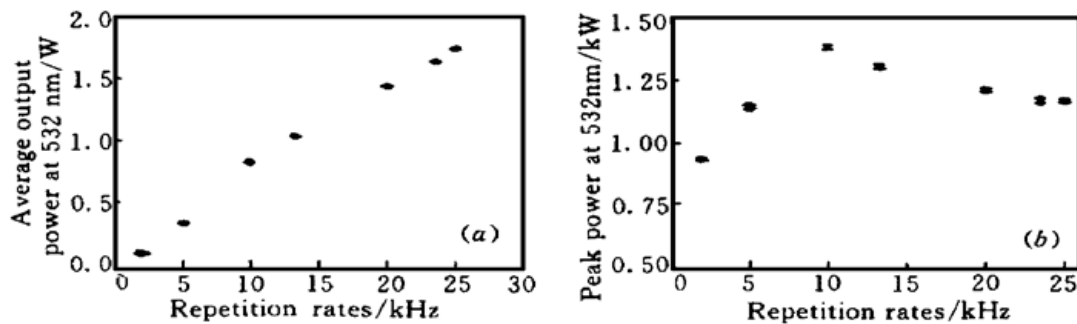


图 2 绿光输出平均功率 (a) 和峰值功率 (b) 随重复频率的变化, 抽运注入功率为 6.3 W

Fig. 2 Output average power (a) and output peak power (b) of 532 nm laser as a function of repetition rates. Incident pump power is 6.3 W

的平均功率随调 Q 重复频率的增大而升高, 脉冲宽度则基本不变, 相应的脉冲峰值功率变化如图 2 (b) 所示, 在脉冲重复频率为 10 kHz 左右时的绿光峰值功率最大, 达到 1.38 kW。

在调 Q 重复频率不变的条件下, 改变抽运功率, 对绿光输出平均功率和调 Q 脉冲宽度进行了测量, 测量的激光阈值为 0.6 W, 结果如图 3 所示, 在重复频率为 25 kHz, 注入抽运功率为 6.3 W 时, 得到平均功率为 1.76 W 的绿光输出, 脉宽为 60 ns, 相应的单脉冲能量为 70.4 μ J, 峰值功率达 1.17 kW, 光-光转换效率达 27.9%, 示波器测量得到的脉冲曲线如图 4 所示。

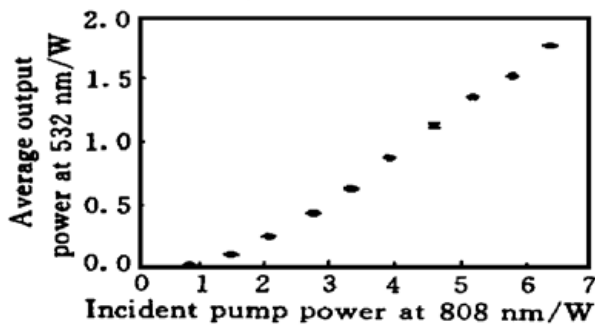


图 3 绿光平均输出功率与抽运功率的输入-输出关系, 调 Q 重复频率为 25 kHz

ig. 3 Average output power of 532nm laser as a function of pump power. The pulse repetition rates is 25 kHz

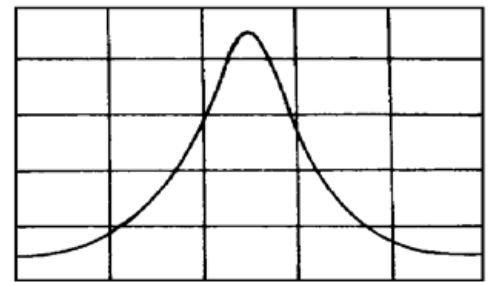


图 4 调 Q 脉冲曲线

Fig. 4 Curve of Q-switched pulse

4 讨 论

在谐振腔参数不变的条件下, 无论是固定抽运功率而改变调 Q 重复频率, 还是固定调 Q 重复频率而改变抽运功率, 测得的绿光脉冲宽度没有明显变化, 这是由于在脉冲重复频率不太大时, 调 Q 脉冲宽度主要是由光子在谐振腔内的寿命决定, 在谐振腔参数不变的条件下, 改变抽运功率和调制重复频率对调 Q 脉冲宽度影响不大。从文献[14]可以看出, 当重复频率继续增加时, 脉冲宽度随重复频率的增加而增加, 而绿光平均输出功率则在重复频率增加到一定数值 (50 kHz) 后不再增加。由于受声光调制器的限制, 我们无法进行更高重复频率的运转。

在实验结果图 2 (a) 中看到绿光输出平均功率与调 Q 重复频率成正比例关系, 即绿光平均功率随重复频率的增大而增加, 而在图 2 (b) 中可以看出绿光输出峰值功率随重复频率的增加有一个极大值, 即在 10 kHz 左右时绿光峰值功率最大。影响激光单脉冲能量的因素很多, 如抽运功率、晶体自发辐射寿命、抽运光分布不均匀、工作物质的反转粒子数分布不均匀等等, 但主要是由 Q 开关关闭期间所积累的上能级粒子数决定, 而在关闭期间上能级粒子数与 Nd·YVO₄ 晶体上能级寿命有直接关系。在调 Q 脉冲的间隔周期接近 Nd·YVO₄ 晶体上能级寿命 (98 μ s) 时 (这时重复频率约为 10 kHz), Q 开关关闭期间所积累的上能级粒子数达到最大值, 在声光晶体调制电压不变的情况下, 形成的单脉冲能量最大。在调 Q 脉冲的间隔周期大于 Nd·YVO₄ 晶体上能级寿命时 (这时重复频率小于 10 kHz), 上能级的粒子数由于自发跃迁开始减少, 及重复频率越小, 上能级的粒子数反而减少, 使得形成的单脉冲能量减少; 而当调 Q 脉冲的间隔周期小于 Nd·YVO₄ 晶体上能级寿命时 (这时重复频率大于 10 kHz), 每次 Q 开关关闭期间积累的上能级粒子数随重复频率的增加而减少, 形成的单脉冲能量也减少。因为重复频率增大时, 单位时间内的激光脉冲增多, 综合结果就是激光平均功率成正比例增加。

我们研究 LD 抽运腔内倍频声光调 Q 绿光激光器是为了进一步实现声光调 Q 的三倍频

(355 nm) 和四倍频(266 nm) 的紫外激光运转, 目前三倍频和四倍频紫外声光调 Q 激光研究正在进行中。

参 考 文 献

- 1 T. Sasaki, T. Kojima, A. Yokotani *et al.*. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21): 1665~ 1667
- 2 C. Yelland, W. Sibbett. Stable 4 W CW solid-state green source pumped by fibre-coupled diode-laser arrays. *J. Mod. Opt.*, 1996, **43**(5): 893~ 901
- 3 J. L. He, W. Hou, H. L. Zhang *et al.*. Continuous-wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of an Nd:YVO₄ laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(6): 418~ 419
- 4 W. L. Wu, S. L. Huang, F. J. Kao. Probing of thermal effects in diode-laser-pumped solid-state laser by precision optical reflectometer. CLEO'98, 1998, CTu12, 101~ 102
- 5 A. Brignon, G. Feugnet, J. P. Huignard *et al.*. Compact Nd:YAG and Nd:YVO₄ amplifiers end-pumped by a high-brightness stacked array. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(3): 577~ 585
- 6 Henry Plaessmann, Kevin S. Yamada, Charles E. Rich *et al.*. Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically Q -switched solid-state lasers. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(33): 6616~ 6619
- 7 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Coupled-cavity electro-optically Q -switched Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 716~ 718
- 8 R. S. Conroy, T. Lake, G. J. Friel *et al.*. Self- Q -switched Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(6): 457~ 459
- 9 A. Agnesi, S. D. Acqua, E. Piccinini *et al.*. Efficient wavelength conversion with high-power passively Q -switched diode-pumped Neodymium lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(8): 1480~ 1484
- 10 Hamid Hemmati, James R. Lesh. High repetition-rate Q -switched and intracavity doubled diode-pumped Nd:YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1018~ 1020
- 11 Y. F. Chen. Passive Q -switching of an intracavity frequency doubled diode-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser with Cr⁴⁺:YAG. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(11): 1481~ 1483
- 12 Eric C. Honea, Christopher A. Raymond, J. Beach *et al.*. Analysis an intracavity-doubled diode-pumped Q -switched Nd:YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532 μm . *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15): 1203~ 1205
- 13 S. Konno, S. Fujikawa, K. Yasui. Highly efficient 68-W green-beam generation by use of an intracavity frequency-doubled diode side-pumped Q -switched Nd:YAG rod laser. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6401~ 6404
- 14 Yuang-Fu Chen. High-power diode-pumped Q -switched intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ laser with a sandwich-type resonator. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(15): 1032~ 1034

High-power Diode-pumped High-repetitive Acousto-optic Q -switched Intracavity Frequency-doubled Nd:YVO₄/KTP Green Laser

Li Jian Lu Xingqiang Hou Wei Xu Zuyan

(Optical Physics Laboratory, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract High-power CW diode-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser by acousto-optic Q -switching is reported here, when the incident power is 6.3 W and the pulse repetition rate is 25 kHz, an average output power of 1.76 W with single pulse width of 60 ns was achieved, giving an optical conversion efficiency of 27.9%. The peak power of 1.17 kW and the single pulse energy of 70.4 μJ have been observed.

Key words all solid-state, acousto-optic Q -switch, high-repetition-rate