

微型高重复频率激光二极管抽运固体激光器的 窄脉宽抽运技术

徐 璠 婧 赵 鸿 张 大 勇 朱 辰 李 尧 姜 东 升

(华北光电技术研究所 固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要 微型化激光二极管(LD)抽运高重复频率固体激光器在工程应用方面总是存在器件散热与体积之间的矛盾。窄脉宽激光二极管抽运技术的使用,不仅提高了产品的光电技术指标,而且将关键元器件的散热功率降到原先的30%,有效地解决了微型元器件散热与体积之间的矛盾,使激光器的整体性能有了显著提高。在工作重复频率2.5 kHz,抽运脉宽120 μ s的条件下,实现了峰值功率12.1 kW,脉冲宽度约为7.7 ns,光束质量因子 M^2 约为1.7的激光脉冲输出,并使激光器在-55~+75 $^{\circ}$ C温度条件下长期稳定工作。窄脉宽抽运技术使整机系统存在很大的拓展空间,在用户需要时可将工作重复频率提高到5 kHz,甚至更高。

关键词 激光器;微型激光二极管抽运固体激光器;高重复频率;窄脉宽激光二极管抽运;工程化应用

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

Narrow Pumping Width Technology in Miniature High-Repetition Diode-Pumped Solid-State Laser

Xu Liujing Zhao Hong Zhang Dayong Zhu Chen Li Yao Jiang Dongsheng

(National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-Optics,
Beijing 100015, China)

Abstract There is always a contradiction between the heat-sinking capability and the volume in the engineering applications of the micro-diode-pumped solid-state laser (DPL). Using of narrow pumping width technology not only improves the products in the quality of photoelectric technology, but also decreases the heat output in key parts of apparatus to 30% of original level. It effectively solves the problem which is the heat output of the tiny parts of apparatus and improves the overall performance of the laser. Under the conditions of repeat frequency 2.5 kHz and pumping duration 120 μ s, it achieves the peak power of 12.1 kW, impulse width of 7.7 ns and the laser beam quality factor M^2 1.7 in pulse output while the laser works stably from -55 $^{\circ}$ C to +75 $^{\circ}$ C. The technology greatly improves the developable space for equipment system. Clients could increase the repeat frequency to 5 kHz or even higher if needed.

Key words lasers; micro-diode-pumped solid-state laser; high frequency; narrow pulse width diode pump; engineering application

1 引 言

激光二极管(LD)的迅速发展给固体激光技术带来了一场意义深远的革命。经过十几年的努力,激光二极管抽运固体激光技术有了长足进步,其转换效率高、工作寿命长、光束质量好的特点已得到人们的广泛认同。随着激光二极管抽运技术的日趋成熟和相关产品的广泛应用,用户对激光器的环境适应性、长期工作的可靠性及器件的微型化提出了严

格的要求。要实现激光器的微型化,尤其是功率元件包括激光二极管、激光工作物质、声光(AO)Q开关的微型化,就要减小这些器件散热装置的体积,但这样会对元器件的散热产生不利的影 响,所以,如何处理好器件散热和体积之间的矛盾成为激光器微型化面临的 最大困难。

本文以研制的微型高重复频率激光二极管抽运固体激光器(DPL)为例,介绍了在产品的研制过程

中遇到的散热问题,并且论述了利用窄脉宽激光二极管抽运技术不仅提高了产品的光电技术指标,而且将关键元器件的发热功率降到原先的 30%,有效解决了微型元器件的散热问题。实验表明,采用该新技术,使激光器的光电性能大幅提高,整机功耗下降一半,工作温度范围也大幅扩展。

2 实验装置

激光器的基本工作原理^[1]如图 1 所示,激光二极管通过自聚焦透镜端面抽运激光^[2~4]工作物质 Nd:YAG 晶体,Nd:YAG 晶体的一端镀对 808 nm 波长增透、对 1064 nm 波长全反的双色膜,它与球面输出耦合镜组成较短激光谐振腔,将声光 Q 开关^[5]插入谐振腔中,并通过控制加载射频功率实现高重复频率、窄脉宽激光脉冲^[6]输出。

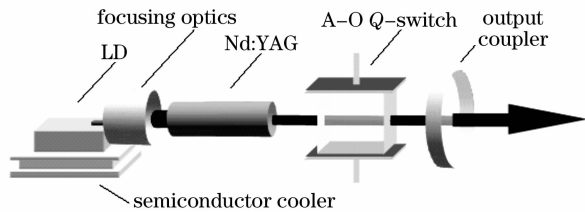


图 1 激光二极管抽运的高重复频率声光 Q 开关固体激光器结构示意图

Fig. 1 Structure of A-O Q-switch diode-pumped solid-state laser

3 理论分析

激光器中采用了连续(CW)输出功率 5 W 的激光二极管作为抽运源,该激光二极管的光电转换效率约为 50%,因此激光二极管工作时有一半的驱动电功率将转化为无用的热,并且激光二极管的工作波长随环境温度产生 0.3 nm/°C 的漂移。因此,激光二极管抽运的固体激光器中都要采取适当的温控措施,但是采用功率较大的制冷器件,将增大整个系统的功耗和散热体积,不利于器件的微型化。因此,在产品设计中采用激光二极管脉冲的工作方式,以降低其功耗,从而减小了散热量,同时控制了整机的体积。

通常,抽运脉宽的选择是依据激光工作物质的上能级寿命,例如常用的 Nd:YAG 晶体,其上能级寿命为 230 μs ,因此,为了获得尽可能大的单脉冲能量,激光二极管的抽运脉冲宽度一般设置在 200~250 μs 。但是当激光器的工作频率为 2.5 kHz,抽运宽度 250 μs 时,其占空比高达 62.5%,如果此时激光二极管满负荷工作,其发热量将达到 3 W,这仍

不能满足降低激光二极管功耗的要求。因此,在做了深入的实验研究后,以大量的实验数据为基础,提出采用窄脉宽激光二极管抽运技术。

3.1 相同电能,窄脉宽抽运技术提高激光单脉冲能量

抽运用的激光二极管本身就是一种激光器,有一定的阈值,当注入电流低于阈值时,激光二极管只发射荧光,并没有激光输出。以连续输出功率 5 W 的激光二极管为例,其阈值电流为 0.7 A,激光二极管发射的抽运光是由 0.7 A 电流以上部分的电能转换而来,因此,即使在相同的电能(电流 \times 脉宽)条件下,抽运脉宽越窄,抽运能量也就越高^[7](如图 2)。

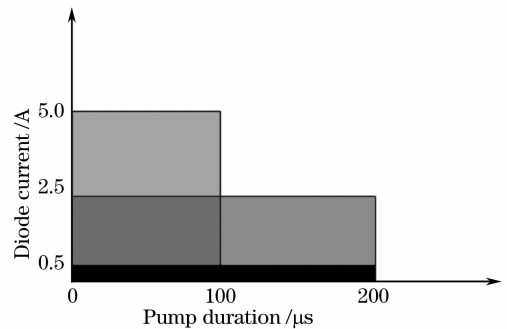


图 2 相同电能量条件下激光二极管发光能量差异原理

Fig. 2 Difference of diode luminescence energy under the conditions of identical electric energy

设工作物质吸收的抽运能量为 E_p ,当粒子从基态经 E_3 能级跃迁到 E_2 能级,并且增益大于损耗时,腔内受激辐射光强不断增加,直到 E_2 能级粒子数降低到该能级集居数密度的阈值,受激辐射光强便开始迅速衰减直至熄灭。因此,有 $E_p \eta_i / h\nu_p - n_{2i} V$ (η_i 表示 E_3 能级向 E_2 能级无辐射跃迁的量子效率, $h\nu_p$ 表示抽运光子能量, n_{2i} 表示 E_2 能级集居数密度的阈值, V 表示工作物质体积)个高能级粒子数对产生的激光能量有贡献,考虑腔内光能部分会变为无用损耗,输出的激光单脉冲能量^[8]为

$$E = \frac{h\nu_o}{h\nu_p} \eta_o \eta_i E_{pt} \left(\frac{E_p}{E_{pt}} - 1 \right), \quad (1)$$

式中 η_o 表示腔内光能经输出镜输出到腔外的系数, E_{pt} 表示腔内由于粒子自发辐射而损失的能量, $h\nu_o$ 表示输出光子能量。

由(1)式可以明显看出, E 随着抽运能量 E_p 线性增加。因此,采用窄脉宽激光二极管抽运,抽运能量增大而激光的单脉冲能量也增大。

3.2 相同抽运能量,窄脉宽抽运技术提高激光单脉冲能量

由激光速率方程可以推导出激光单脉冲能量^[9]为

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right), \quad (2)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量, σ 为增益材料的受激发射截面, γ 为增益介质的反转降低系数, 表示激光发出一个光子导致反转粒子数密度降低的大小, R 为输出耦合镜的反射率, A 表示增益介质和可饱和吸收体内的有效腔模的横截面积, n_i 表示脉冲开始时增益介质内粒子反转密度, n_t 表示脉冲熄灭时增益介质内粒子反转密度。

由(2)式可以看出, 在腔形结构和参量都一样的情况下, 激光单脉冲能量仅与抽运所产生的反转粒子数有关。但是, 在工作物质的上能级寿命内, 反转粒子数也会因自发辐射的存在而减小。在激光材料的储能过程中, 时刻存在着随机的自发辐射现象, 而这种自发辐射的概率是随着储能时间的增加而增加的。例如 Nd:YAG 晶体^[10] 上能级寿命为 230 μs ,

是指 230 μs 时有 63% 的上能级粒子已经通过自发辐射的方式损耗掉。因此, 脉冲抽运时间越长, 通过自发辐射损失的上能级粒子数的比率越高, 进一步影响激光器的光光转换效率, 从而导致了激光输出效率的降低。窄脉宽激光二极管抽运技术会减少自发辐射现象, 也就相应地增加了工作介质中的反转粒子数, 使激光输出的能量增大。

4 实验结果及分析

图 3 是在相同抽运能量条件下实验获得的实际输出峰值功率。由图 3(a) 可以看出, 当抽运宽度由 120 μs 上升到 200 μs 时, 激光输出的单脉冲能量下降了 20%, 由图 3(b) 可以看出, 输出脉冲宽度随抽运宽度的变化增加了 12%, 由此可以计算出, 激光输出的峰值功率在抽运宽度为 120 μs 时最大, 如图 3(c) 所示。

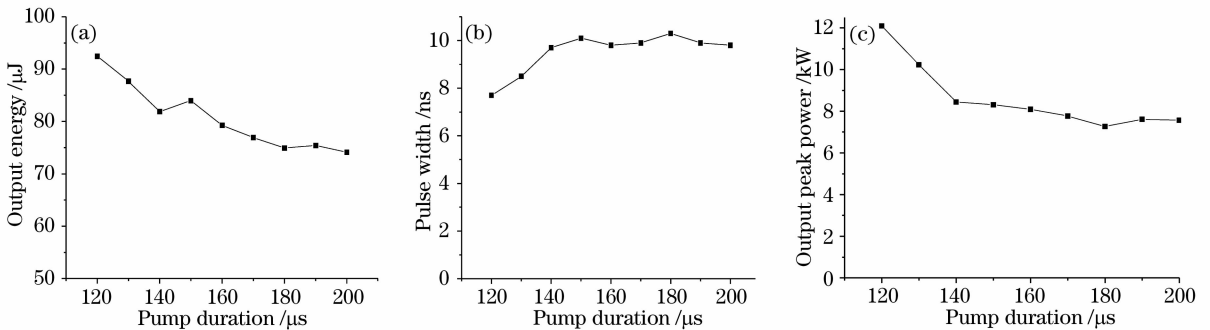


图 3 相同抽运能量条件下激光脉冲能量(a), 脉冲宽度(b)和峰值功率(c)随抽运宽度的变化

Fig. 3 Laser single pulse energy (a), pulse width (b) and peak power (c) change with pumping duration under the condition identical pumping energy

在研制过程中, 让连续工作的激光二极管以脉冲方式工作, 不仅使激光器的工作寿命大大延长, 而且在工作重复频率 2.5 kHz, 抽运脉宽 120 μs 条件下, 连续输出功率 5 W 激光二极管的占空比仅为 30%, 工作时的产热量仅为 1.5 W, 大大降低了温控系统的负担。最终实现单脉冲能量为 93 μJ , 脉冲宽

度约为 7.7 ns 的激光脉冲输出。图 4 为激光输出脉宽图。当实现峰值功率 12.1 kW 时, 光束质量因子 M^2 约为 1.7, 光强分布如图 5 所示。由于窄脉宽抽运技术的使用, 关键元器件的散热量大大降低, 使得激光器可以在 $-55 \sim +75$ $^{\circ}\text{C}$ 温度条件下长期稳定工作, 如图 6 所示。并且根据客户的需要, 还可以将重复频率扩展到 5 kHz, 甚至更高。

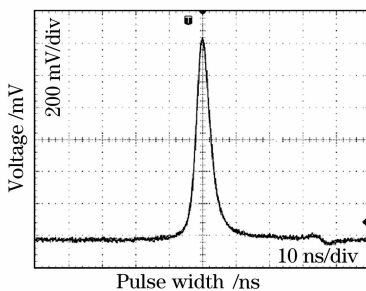


图 4 输出激光脉宽图

Fig. 4 Laser pulse width curve

在此基础上, 进一步减小激光器的外形和重量, 如图 7 所示。整机尺寸为 156 mm \times 120 mm \times 47 mm, 内部不仅装有激光器, 还包括激光二极管驱动/温控一体化电源、声光 Q 开关驱动源等, 组成了一个功能完整的整体, 只需提供 24~30 V 的直流供电和标准信号, 激光器就能自动工作, 其常温功耗仅有 22 W, 提高了整机的可靠性, 同时也方便了用户的使用。

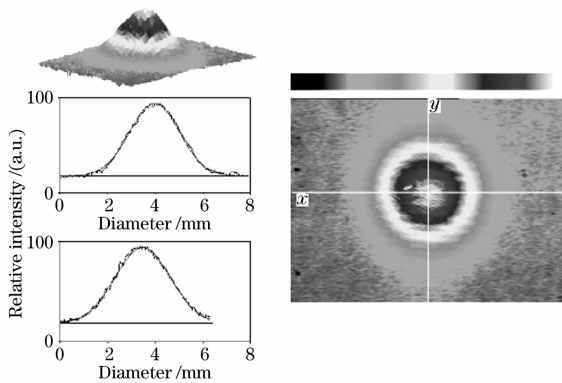


图 5 光斑分布图

Fig. 5 Intensity distribution of laser beam

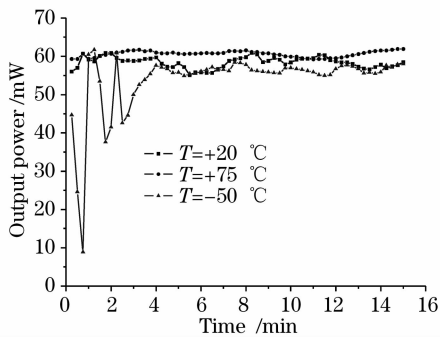


图 6 不同温度环境条件下,激光器输出功率曲线

Fig. 6 Laser output power curves at different temperature conditions



图 7 激光器整机照片

Fig. 7 Image of the laser

5 结 论

窄脉宽激光二极管抽运技术的使用不仅使激光二极管的寿命大幅提高,而且较好地解决了元器件在工程应用中的散热问题,优化了整机性能,简化了

结构设计。经过实际测试和验证,表明这种技术在工程上有较为广阔的应用前景。在保持激光器整机外形结构和大部分元器件不变的前提下,将激光器的重复频率提高到几十千赫兹甚至更高,同时获得较好的光电技术指标,该工作正在进行中。

参 考 文 献

- 1 Guo Zhen, Wang Shiyu, Wen Jianguo *et al.*. Q-switching technology of DPL with high repetition rate and short pulse duration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, **30**(4): 286~288
过 振,王石语,文建国 等. 高重复频率激光二极管抽运激光器窄脉宽调制技术[J]. *红外与激光工程*, 2001, **30**(4): 286~288
- 2 Zheng Yi, Qian Weihong, Liu Fuyi *et al.*. Theoretical study on single-frequency operation of diode laser-end-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 894~899
郑 义,钱卫红,刘夫义 等. 激光二极管端面抽运的单频固体激光器的理论研究[J]. *光学学报*, 1997, **17**(7): 894~899
- 3 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm Nd:YVO₄ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1069~1072
李海峰,周 睿,赵 璞 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄实现 1386 nm 连续波激光输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1069~1072
- 4 Chunyu Wang, Huaguo Zang, Xiaoli Li *et al.*. LD-pumped high repetition rate Q-switched Nd:YVO₄ laser by using La₃Ga₅SiO₁₄ single crystal electro-optic modulator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6): 329~331
- 5 Du Junlan, Yu Liansheng, Chang Maosen *et al.*. The research on acousto-optic Q-switch used in LD-pumped Nd:YAG laser[J]. *Ocean Technology*, 1998, **17**(3): 71~75
杜军兰,于连生,常茂森 等. 用于激光二极管抽运的 Nd:YAG 激光器中声光 Q 开关的研究[J]. *海洋技术*, 1998, **17**(3): 71~75
- 6 Zhang Xingyu, Wang Qingpu, Zhao Shengzhi. Inversion reduction factor of pulsed solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(7): 687~691
张行愚,王青圃,赵圣之. 固体脉冲激光器的反转因子[J]. *光学学报*, 1994, **14**(7): 687~691
- 7 Susumu Konno, Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa *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
- 8 Zhou Bingkun. Laser theory[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. 165~177
周炳琨. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 165~177
- 9 J. J. Zayhowski, P. L. Kelley. Optimization of Q-switched lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(9): 2220~2225
- 10 Yang Yongming, Wang Shiyu, Cai Defang *et al.*. Thermal effect of end deformation in laser diode end pumped Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 582~586
杨永明,王石语,蔡德芳 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YAG 的端面形变[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 582~586