

文章编号: 0253-2239(2007)07-1228-4

角锥棱镜腔激光二极管抽运被动调 Q 激光器

卢常勇¹ 李莉² 刘旭¹ 张玺¹ 张晶¹ 曹海源¹ 程勇¹

(¹ 武汉军械士官学校光电技术研究所, 武汉 430075)
(² 武汉军械士官学校光学教研室, 武汉 430075)

摘要: 为了提高传导冷却条件下激光二极管(LD)侧向抽运被动调 Q 激光器的光束质量和输出稳定性, 采用了两组半圆柱面激光二极管阵列侧向交错抽运两根串接的激光棒, 实现了均匀抽运和散热。通过实验分析了横模结构对被动调 Q 稳定性的影响, 设计了角锥棱镜-高斯输出镜非稳腔, 在显著提高器件光束质量的同时, 明显改善了被动调 Q 的稳定性, 并保证了谐振腔的机械稳定性。在此基础上研制了一台重复频率 20 Hz、单脉冲能量 64 mJ、脉冲宽度 7 ns、稳定性优于±5%、光束发散角 0.6 mrad、光-光效率 9.1%, 且光轴指向稳定的工程实用器件。

关键词: 激光技术; 角锥棱镜; 非稳腔

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Laser Diode-Pumped Passively Q-Switched Laser with Corner-Cube Resonator

Lu Changyong¹ Li Li² Liu Xu¹ Zhang Xi¹ Zhang Jing¹ Cao Haiyuan¹ Chen Yong¹

(¹ Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 400075)
(² Teaching and Research Section of Optics, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 400075)

Abstract: Two Nd:YAG rods are opposed and offset pumped by two half-cylinder laser diode array for uniform pumping and heat releasing, to improve the laser beam quality and output stability of the passively Q-switched laser side-pumped by laser diode under transfer cooling conditions. The effect of transverse-mode structure on passively Q-switched stability is experimentally studied. An unstable corner-cube prism-Gaussian output mirror cavity is studied. The laser beam quality of the device is improved greatly, as well as the passively Q-switched laser stability, and the mechanical stability of resonator. A practical engineering instrument with high stability and high beam quality is developed, with repetition frequency of 20 Hz, single-pulse energy of 64 mJ, pulse width of 7 ns, stability better than ±4.5%, beam divergence of 0.6 mrad, and optical-optical efficiency of 9.1%.

Key words: laser technology; corner-cube prism; unstable cavity

1 引言

激光二极管抽运的被动调 Q 固体激光器具有体积小、寿命长和可靠性高等优点, 且系统采用传导冷却, 可避免复杂的水冷装置, 因此广泛应用于各种无条件进行水冷的机载和星载激光系统中。在激光二极管侧面抽运方式中, 为了获得低阶模输出, 通常在激光棒和激光二极管阵列之间加入整形光学系统, 造成结构复杂且能量损耗较大。采用激光二极管近贴直接抽运易实现激光器的小型轻量化, 但是

很大部分抽运能量被激光棒基模体积外的外层所吸收^[1], 易发生多模运转, 导致光束质量下降。多模运转再加上各模式间的竞争是导致 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光器输出不稳定的主要原因^[2], 易引起输出能量不稳定。同时, 普通腔型的激光二极管抽运固体激光器(DPL)在恶劣环境条件下易产生机械变形和热应力效应, 不能适应机载或卫星发射等情况下环境变化的需要^[3]。因此, 设计军用激光器时必须综合考虑光束质量、输出稳定性和机械稳定性三方

作者简介: 卢常勇(1979—), 男, 福建南平人, 讲师, 主要从事全固态激光器件方面的研究与设计。

E-mail: gdyjs@263.net

收稿日期: 2006-08-15; 收到修改稿日期: 2006-11-15

面的因素。

针对以上问题,本文设计了半圆柱面激光二极管阵列侧面交错抽运结构结合角锥棱镜非稳腔,结果明显改善了侧面近贴直接抽运的光束质量,提高了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的输出稳定性,并利用角锥棱镜的自准直特性极大地提高了激光器的机械稳定性。

2 激光器设计

2.1 抽运几何设计

为了达到良好的散热,传导冷却的侧向抽运激光二极管抽运固体激光器难以实现均匀抽运,导致激光介质内的增益分布不均匀,十分不利于基模振荡。因此,抽运几何设计的关键是提高抽运的均匀性以实现激光介质截面上的增益呈中心对称的径向高斯分布,尽量提高增益场与基模的重叠度^[4,5]。采用半圆柱面激光二极管阵列侧面直接抽运两根串接的激光棒,激光棒非抽运侧面紧贴在散热凹槽上,实现传导冷却,两根棒的抽运几何呈交错分布以实现均匀的抽运和良好的散热,如图 1 所示。

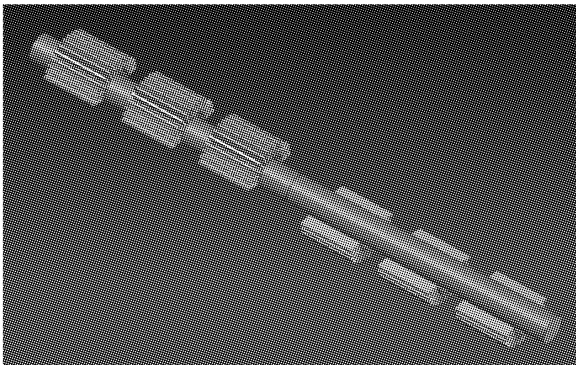


图 1 交错抽运几何

Fig. 1 Interleaving pump module

由于激光介质的增益分布程度与所吸收的抽运光成比例,所以可以通过检测抽运光的荧光分布来分析激光介质的增益分布情况^[4,6],图 2、图 3 为实

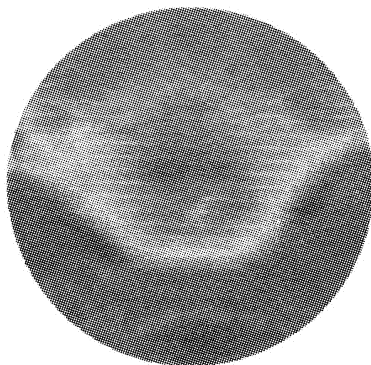


图 2 单棒侧向抽运的荧光分布

Fig. 2 Fluorescence distribution of side-pumped single rod

验测得的单棒单侧抽运和双棒交错抽运下激光介质横截面内的荧光分布。可以看出,在双棒侧向交错抽运下,激光介质内的增益在棒中心处最高,随着半径增加逐渐减小,近似呈高斯平顶分布,实现了热传导冷却条件下的均匀抽运效果。

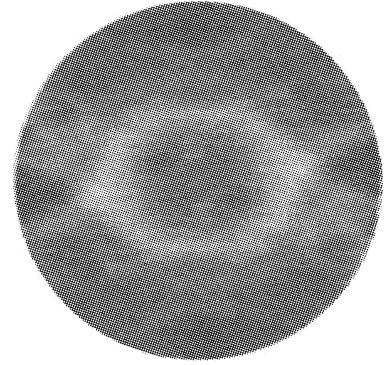


图 3 双棒侧向交错抽运的荧光分布

Fig. 3 Fluorescence distribution of a pair of opposed and offset pumped two rods

该抽运几何的热传导冷却结构简单易于加工,且两根棒中的热流方向正好相反,具有径向抛物线形的热梯度分布,即产生的热透镜效应是径向对称的,得到近似水冷均匀散热的效果,易于对热效应进行补偿。同时传统热传导冷却下,激光介质必然产生热光楔效应以引起光轴漂移,而这种双棒交错的抽运几何能使光束在一个棒中产生的偏转在另一棒中得到校正,保证了光束指向的稳定性。

2.2 谐振腔的设计

虽然抽运几何设计解决了传导冷却下的均匀抽运问题,但由于 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体的增益较高,依然容易形成多模振荡,光束发散角增大;根据文献[7],激光器的横模结构是引起被动调 Q 不稳定的主要因素。因此必须对谐振腔进行选模以提高光束质量和改善被动调 Q 的稳定性。此外,在特殊应用环境下,系统的可靠运转往往比获得最佳性能更为重要。即要求谐振腔结构或腔模对温度的变化和机械不对准是相当不灵敏的。为满足这一要求,国内外试图用各种形式的棱镜腔^[8~10]来改善激光器的机械稳定性、热稳定性和光束质量。因此谐振腔设计的关键是在保证激光器高稳定性前提下,实现大体积基横模输出,达到压缩发散角和提高被动调 Q 稳定性的目标。在上述抽运模块的基础上又设计了一种基于角锥棱镜的平凸非稳腔,采用平面角锥棱镜作为谐振腔的全反镜,高斯镜(GRM)作为输出镜,如图 4 所示。

平凸非稳腔是一种理想的获得基横模输出的腔

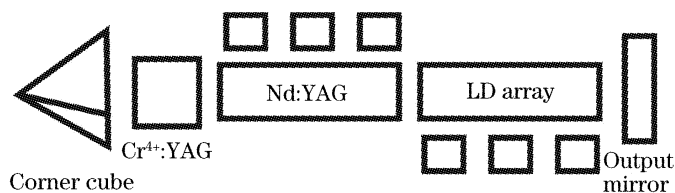


图 4 激光器结构

Fig. 4 Configuration of laser

型,它具有大而均匀的模体积、抗失调能力强和输出近似均匀球面波等优点。同时由于腔内球面波振荡,对激光介质和调Q元件的热畸变及光学均匀性不敏感,输出能量稳定^[11]。但由于硬边光阑的衍射效应,使得近场光斑为环形,不利于工程应用。采用高斯输出镜可以消除硬边光阑的衍射效应,获得近衍射极限的光束质量。利用角锥棱镜取代平面全反镜后,可大大提高谐振腔的抗失调能力,其匀光效应使得腔内振荡光线相对于光轴对称交换穿行,对各种不均匀造成的激光介质的增益分布不均匀进行了匀化,改善了激活介质热效应,避免了腔内光学元件的损伤。

2.3 结构设计

激光器具体结构如图4所示,6个国产半圆柱面激光二极管阵列,每个阵列有10个线阵,抽运电流75 A时每个线阵峰值功率为60 W,分两组交错直接抽运两根串接的Nd:YAG激光棒,晶体尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为1%,两端镀1064 nm增透膜,侧面打毛。激光棒非抽运侧面紧贴在散热凹槽上,实现传导冷却。激光二极管通过热沉将热量传导给半导体制冷器,温控电路通过闭环控制半导体制冷器的工作电流及工作温度。全反镜是尺寸为 $\Phi 8 \text{ mm}$ (底面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 增透膜)的角锥棱镜。输出镜为高斯镜,其中心反射率为54%, $2\omega_m = 2.8 \text{ mm}$, $n=2$;激光器腔长为130 mm。用初始透射率为20%的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体进行被动调Q。

3 实验及结果

实验中,全反镜为角锥棱镜,通过更换高斯输出镜和平面输出镜(透过率70%)分别实现单模和多模运转。用EPM1000型激光功率/能量计监测激光输出,TEK-P6701A型光电探头和TDS3052型500 MHz数字式存储示波器测量脉宽,LBA-700PC-D型光束质量分析仪监测荧光分布和激光场分布。

对于同一块初始透射率为20%的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体调Q,抽运脉宽为 $240 \mu\text{s}$ 。多模输出下阈值电

流为45 A,对应抽运能量518 mJ,平均输出动态能量为60 mJ,光-光效率11.6%,插头效率4.6%;单模工作下,阈值电流为61 A,对应抽运能量703 mJ,平均输出动态能量64 mJ,光-光效率9.1%,插头效率3.6%。

图5为重复频率20 Hz下,用LBA-700PC-D型光束质量分析仪记录下的单模和多模输出的光束远场分布,可以看出单模情况下,光束远场呈中心高度突起的高斯基模分布,对应的 M^2 因子为 $M_x^2=1.3$ 、 $M_y^2=1.2$ 。在1 m透镜焦点处用黑相纸分别记录下的单模输出和多模输出下的远场聚焦光斑见图6,利用套孔法测得的发散角分别为0.6 mrad和2.4 mrad。可见,由于采用该半圆柱面激光二极管阵列侧向交错直接抽运结构,抽运光场与基模之间的重叠度较高,采用普通谐振腔就能得到光束质量好、效率高的多模输出;使用高斯镜作为输出镜的平凸非稳腔后,实现了接近衍射极限的单横模输出。

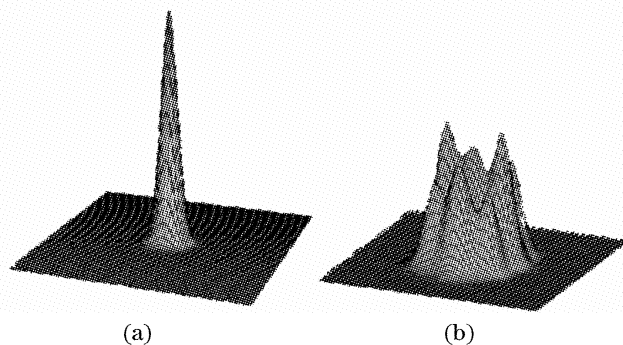


图 5 远场光场分布。(a) 单模,(b) 多模

Fig. 5 Far-field distribution. (a) Single mode, (b) multimode

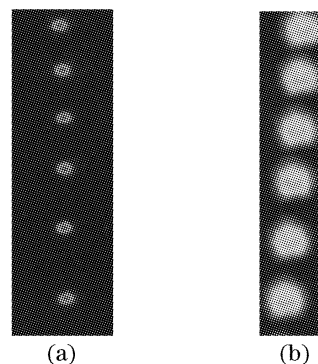


图 6 远场光斑。(a) 单模,(b) 多模

Fig. 6 Far-field laser spot. (a) Single mode, (b) multimode

在重复频率20 Hz下,激光器连续工作30 min,利用EPM1000能量计记录下每个脉冲的能量,对多模和单模输出能量的稳定度进行比较,检测结果如图7所示。激光器多模工作时,测得最大74.2 mJ,最小54.8 mJ,平均60 mJ,稳定度 $\pm 16\%$;单模输出下,最大66.8 mJ,最小61 mJ,平均64 mJ,稳定度

±4.5%。可以看出,采用非稳腔选单横模运转后,由于不存在模式竞争,使基横模可以稳定振荡,被动调 Q 输出的稳定性得到根本性改善。

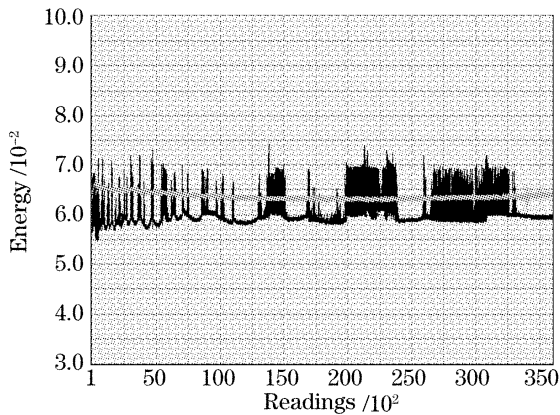


图 7 长时间输出能量稳定性

Fig. 7 Output energy stability

在实验中发现单模运转下的脉冲宽度约为 7 ns,明显小于多模下的脉冲宽度(13 ns),且波形光滑稳定(图 8)。这是由于在多模工作下,不同横模脉冲建立的时间也是不同的,输出的脉冲实际上是这些建立的时间间隔不同的脉冲的叠加,故其脉宽相对于单模工作下显著展宽。

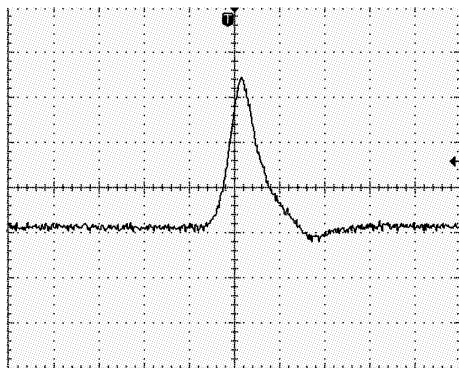


图 8 单模振荡时的脉冲波形

Fig. 8 Pulse profile of single transversal mode

对该激光器进行了环境实验,在 +50 °C 高温环境下测得激光输出平均能量为 65 mJ,在 -40 °C 低温环境下测得激光输出平均能量为 58 mJ,光轴指向稳定,无漂移。还通过了振动和冲击等实验,主要技术指标均无明显变化。结果表明,采用角锥棱镜后,保证了激光器在振动、冲击和大的温度变化下有足够高的机械稳定性和热稳定性,完全满足机载和星载等军事应用需求。

4 结 论

文中通过对侧向直接抽运激光二极管抽运固体激光器光场分布的分析,设计了半圆柱面激光二极管阵列侧向交错抽运结构,实现了传导冷却条件下

的均匀抽运,保证了输出激光的光束质量。并研究了多模运转对被动调 Q 稳定性的影响后,设计了采用高斯输出镜的角锥棱镜非稳腔,在重复频率 20 Hz 时,得到了输出能量 64 mJ、脉宽 7 ns、光束发散角 0.6 mrad、稳定性优于 ±5%、光-光效率 9.1% 的接近衍射极限的单横模输出。利用角锥棱镜高的抗失调特性保证了激光器的可靠运转,且光轴指向稳定,大大提高了器件的环境适应性。整机结构简单、紧凑、高效,满足了军用激光器对光束质量和稳定性的要求。

参 考 文 献

- Gong Mali, Zhai Gang, Jin Feng *et al.*. High-efficiency laser-diode side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 900~903 (in Chinese)
巩马里,翟刚,金锋等. 激光二极管侧面抽运的高效率 Nd:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 1997, **17**(7): 900~903
- Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.*. Saturable absorption of Cr⁴⁺:YAG and its performance as passive Q-switches[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1665~1670 (in Chinese)
欧阳斌,丁彦华,万小珂等. Cr⁴⁺:YAG 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(12): 1665~1670
- Luis Ramos-lzquierdo, Jack L. Bufton, Patricia Hayes. Optical system design and integration of the Mars observer laser altimeter [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 307~322
- Wang Jianhua, Zhai Gang, Jin Feng *et al.*. Pump uniformity study of solid-state laser rods directly side-pumped by laser diode [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1): 36~41 (in Chinese)
王建华,翟刚,金锋等. LD 直接侧面抽运棒状介质的光场研究[J]. *激光技术*, 2004, **28**(1): 36~41
- Hou Xia, Lu Yutian, Hu Qiquan. Diode side-pumped enfolded cavity Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1349~1352 (in Chinese)
侯霞,陆雨田,胡企铨. 折返式激光二极管侧抽运 Nd:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1349~1352
- Wang Jianjun, Jiang Dongsheng, Zhao Hong. Research on diode side-pumped TEM₀₀ mode lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(5): 286~288 (in Chinese)
王建军,姜东升,赵鸿. 二极管侧面泵浦固体激光器 TEM₀₀ 模输出研究[J]. *激光与红外*, 2000, **30**(5): 286~288
- Ding Yanhua, Ouyang Bin, Xu Jun *et al.*. Stability and power improvement in passive Q-switching of CW Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **24**(3): 197~201 (in Chinese)
丁彦华,欧阳斌,徐军等. 连续 Nd:YAG 激光器中 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 的稳定性和功率的提高[J]. *中国激光*, 1997, **24**(3): 197~201
- Thomas G. Crow. Laser Apparatus Employing Mechanical Stabilization Means[P]. *US Patent*, 1974, 3, 924, 201
- Shi Y S F. Laser resonator[P]. *JP Patent*: 6-338644, 1994
矢野宣夫. 激光振荡器[P]. 日本专利: JP 6-338644, 1994
- Fan Qikang, Lu Zhukang, Wu Bizhen *et al.*. Stable and animated polarized laser[P]. *China Patent*: 87216562, 1987 (in Chinese)
范琪康,陆祖康,吴碧珍等. 稳定准直的线偏振输出激光器[P]. 中国专利: 87216562, 1987
- Wu Fengtie, Zhang Wenzhen. Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched laser in different cavity configurations [J]. *J. Huaqiao University*, 2000, **21**(3): 239~242 (in Chinese)
吴逢铁,张文珍. 不同腔型 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光器[J]. *华侨大学学报*, 2000, **21**(3): 239~242