

文章编号: 0253-2239(2005)05-623-6

# 拱形激光二极管侧抽运Nd:YAG固体激光器的 实验研究

侯 霞 陈卫标 李永春 顾圣如 胡企铨 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 详细阐述了同心抽运、同心冷却的激光二极管紧包侧抽运Nd:YAG激光器的实验研究工作。这种抽运结构使晶体内的增益场与谐振腔基模实现了良好的匹配,易于得到良好的光束质量和大能量输出,基模提取效率高。模拟分析了晶体内的增益场以及横截面内的温度分布,从不同角度探讨了激光二极管的温度特性对器件工作的影响。研究了晶体的热致退偏效应对器件调Q工作的影响,并且初步探讨了不同腔长、不同腔型下器件的工作情况,这些实验结果对进一步优化使用这种抽运结构有指导意义。所设计的激光器在工作频率 6 Hz 时,得到了斜效率为 44.3%的多模调Q输出。在抽运能量 735 mJ 时,得到最大输出能量 135 mJ,脉宽 7.6 ns 的调Q脉冲,光光效率为 18.4%,插头效率为 11.0%,光束发散角小于 1.5 mrad。

**关键词:** 激光器; 固体激光器; 激光二极管; 侧抽运; Nd:YAG晶体

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Experimental Study for an Arched Diode-Side-Pumped Nd:YAG Lasers

Hou Xia Chen Weibiao Li Yongchun Gu Shenru Hu Qiquan Lu Yutian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** The characterization of an arched diode-side-pumped Nd:YAG laser was reported. A concentric-pumping and concentric-cooling close configuration was used for the laser. The pump light distribution and temperature profile were calculated and optimized. Influence of the laser diode chirp and sag on the laser output, the effect of thermal birefringence on the laser Q-switch output and laser output under different resonator length and different cavity have been studied. A maximum output of 135 mJ in multimode Q-switch operation is obtained with pumped energy 735 mJ (marked value). The pulse width is 7.6 ns and the full divergence angle is smaller than 1.5 mrad. The slope efficiency is 44.3%. The optical-optical efficiency is 18.4%.

**Key words:** lasers; solid state laser; laser diode; side-pumped; Nd:YAG crystal

### 1 引 言

随着激光二极管(LD)抽运的固体激光器更广泛地应用在医疗、通信、机加工以及遥感测距中,其得到了不断的发展。为满足机载、星载遥感测距的应用,结构紧凑,抗冲击、振动,采用纯传导方式冷却结构,适用于军用等恶劣条件下的大能量激光器也日益受到关注。

通常大功率激光二极管抽运的固体激光器多采用激光二极管侧面抽运方式。侧面抽运相对端面抽运有着不可比拟的优点,虽然采用侧抽运方式,基模

提取效率小,但是可以靠简单的增加抽运长度来承载更多的抽运能量。而端面抽运方式,由于会在晶体端面产生巨大的热应力,受限于晶体材料的破坏阈值,抽运功率有限。

Nd:YAG是目前常用的激光晶体之一。Nd:YAG脉冲激光器,也是遥感测距中使用最广泛的激光器<sup>[1,2]</sup>。为提高抽运效率和光束质量,人们针对棒状的Nd:YAG晶体设计了各种不同的抽运结构<sup>[3~6]</sup>。常采用柱透镜将激光二极管抽运光聚焦整形后输入晶体,这种方式一般会带来10%的能量

作者简介: 侯 霞(1975~),女,在读博士研究生,助理研究员,主要从事激光二极管抽运的大功率大能量固体激光器技术的研究。E-mail: hxlf@163.net

收稿日期: 2004-06-07; 收到修改稿日期: 2004-10-25

损耗。如省却光学整形部分,采用直接贴近抽运的方式,既结构简单,又有利于提高器件效率。同时采用恰当的抽运结构,依然能得到满意的光束质量。

为此我们设计了拱形激光二极管侧抽运的Nd:YAG激光器,它采用独特的同心抽运、同心冷却的紧包抽运结构。工作频率6 Hz时,得到斜效率为44.3%的调Q输出。在注入抽运能量为735 mJ时,得到最大输出能量135 mJ,脉宽7.6 ns,光-光效率18.4%,发散角小于1.5 mrad的结果。

## 2 实验装置

同心抽运同心冷却的抽运结构示意图见图1。准连续线阵列激光二极管呈拱形排列,利用柱状晶体的部分弧面进行冷却。采用温差电致冷器(TEC)分别对激光二极管和晶体热汇控温,精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。晶体热沉选用导热率大的紫铜材料,它与晶体之间采用金属焊接。为减小损耗,激光二极管的发光面尽量靠近晶体。激光二极管的结平面方向平行于晶体的轴线。

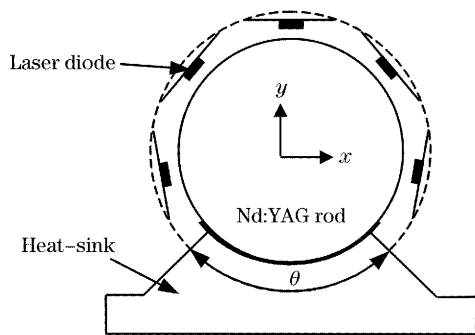


图1 抽运结构截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pumping configuration (transverse view)

我们采用几何光线追迹的方法,对晶体横截面内的抽运光场进行了模拟研究<sup>[7~11]</sup>。假设激光二极管的发光场强度分布为准高斯分布,垂直结平面方向的发散角半峰全宽(FWHM)为 $40^\circ$ ,而平行结平面方向的发散角半峰全宽为 $10^\circ$ 。晶体侧面为毛面,按ABg散射模型处理, $A=B=0.002$ , $g=2.5$ ,反射率按菲涅耳反射系数估计为8.5%。不考虑晶体热沉和晶体接触部分的金属层对抽运光的反射。激光二极管的发光面距晶体表面0.5 mm。计算结果见图2。从中可见抽运光场在晶体中心区域存在一强区,增大了与谐振腔基模的重叠程度,有利于提高谐振腔基模的提取效率。进一步的计算表明,部分环状的抽运结构也能得到类似圆周对称抽运的抽运光场。

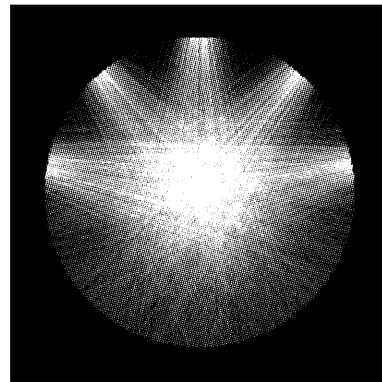


图2 抽运光模拟分布

Fig. 2 Calculated pump light distribution

这种抽运结构,由于采用了同心抽运同心冷却的方式,相应的带来两个相互矛盾的需求。为注入更多的能量,需要加大晶体受抽运的面积;而为了充分的冷却晶体,需要加大晶体冷却面积。也就是冷却接触角 $\theta$ (见图1)的选取问题。我们对不同掺杂浓度晶体的抽运光场,不同冷却接触角 $\theta$ 下的晶体热效应进行了模拟分析(具体将另文介绍),并结合实际结构考虑,最终选取冷却接触角为 $90^\circ$ ,激光二极管受抽运的角度为 $200^\circ$ 。在这种冷却条件下,晶体横截面内y轴的温度分布的模拟结果见图3。

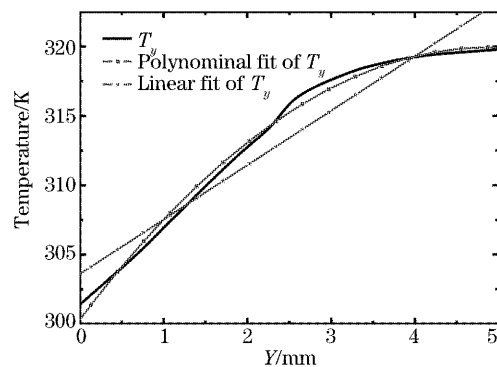


图3 晶体横截面内y轴温度分布模拟图

Fig. 3 Temperature distribution at y axis in rod transverse section

实际抽运模块由4组准连续线阵列激光二极管组成,每组按9边形排布,均布在其中5边,每边有3条激光二极管阵列。总计60条激光二极管阵列,每条激光二极管阵列标称值为:抽运波长808 nm,带宽小于4 nm,阈值电流约为10 A,抽运脉宽200  $\mu\text{s}$ ,抽运电流70 A时,额定发光功率为60 W,垂直结平面方向的半峰全宽约为 $40^\circ$ ,平行结平面方向的半峰全宽约为 $10^\circ$ ,电光效率约60%。实验中由于受到激光二极管驱动电源的限制,抽运电流只能加载60 A,此时激光二极管总抽运能量为600 mJ(标称值)。

采用的增益晶体Nd:YAG直径为5 mm,长度为57 mm,掺杂原子数分数为1%。晶体两端面镀1064 nm增透膜,侧面打毛。激光二极管发光面距离晶体表面设计值为0.5 mm,实际为0.3~1 mm。

数值估计此时晶体对抽运光的吸收效率为87.4%。则当激光二极管的抽运脉宽为200 μs时,晶体吸收的总能量为525 mJ。实验装置示意图见图4。

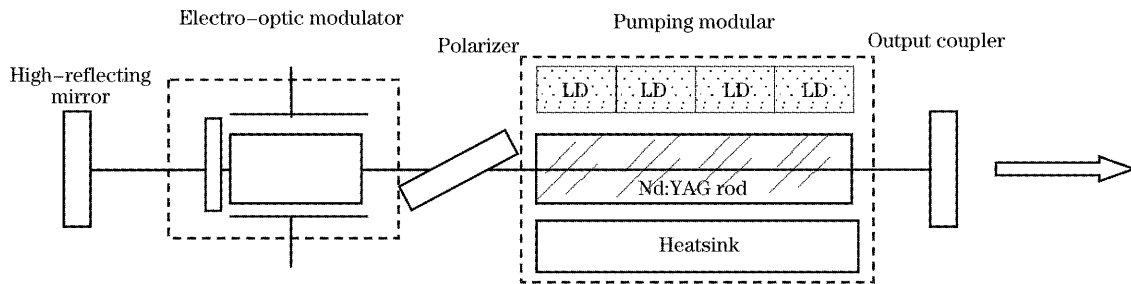


图4 激光二极管侧抽运 Nd:YAG 激光器的腔结构示意图  
Fig. 4 Cavity configuration of LD side-pumped Nd:YAG laser system

### 3 实验结果

激光器的效率很大程度上依赖于晶体对抽运光的吸收效率。在一定的抽运结构下,抽运光的吸收效率取决于晶体在抽运光谱线处的吸收系数、吸收带宽和抽运光的谱线、谱宽。而激光二极管的输出受环境温度和本身温度变化的影响非常严重<sup>[12]</sup>,会出现波长漂移和功率下降的现象。这种现象在晶体的吸收带宽很窄的情况更为严重。Nd:YAG在808 nm附近的吸收带宽为3.5 nm。实验证明,温度对激光二极管的影响是不可忽视的。

我们利用 Ocean Optics 公司的 HR2000 波长计测量了不同工作温度下激光二极管的输出光谱。由于激光二极管封装的特殊性,为避免激光二极管互相直射,须在晶体安装的情况下测量。从图5中可以看到在808 nm附近,谱线存在一个明显的吸收峰。而真

实激光二极管发光谱线应近似是实测谱线的高斯包络曲线。对激光二极管在工作温度范围20~30℃内,工作频率为1 Hz、5 Hz、25 Hz,抽运电流60 A的光谱分别进行了测量。测量温度点距离激光二极管的发光区约2 mm,此温度点同时作为温差电致冷器的温度控制点。为使图示清楚,在图5中仅绘制了部分测量结果。图6中给出了对测量结果拟合分析的结果。可见激光二极管输出的峰值波长随温度的变化是非常显著的,不同的激光二极管工作频率之间存在些许不同。随着温度的升高,输出波长以+0.28 nm/℃的速率向长波方向移动。这对器件的稳定工作提出了苛刻的控温要求。随着工作温度的增加,谱线出现多个峰值,线宽增加,可见单激光二极管阵列之间输出的峰值波长随温度的变化方向和速率是不同的,封装的激光二极管存在个体的差异。这种温度的变化使得激光二极管的输出功率分散,实际有效的抽运能量下降。在此基础上我们比较了不同

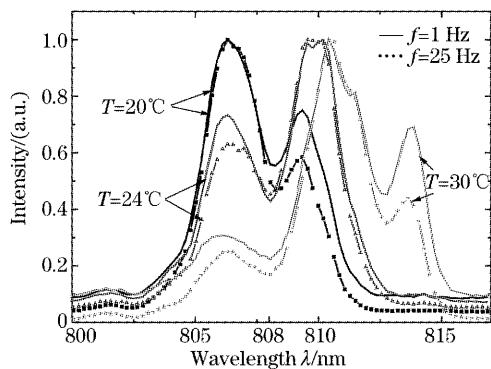


图5 不同工作温度下测得的发光谱线  
(激光二极管工作电流60 A)

Fig. 5 Measured spectra at different working temperature  
(LD's current is 60 A)

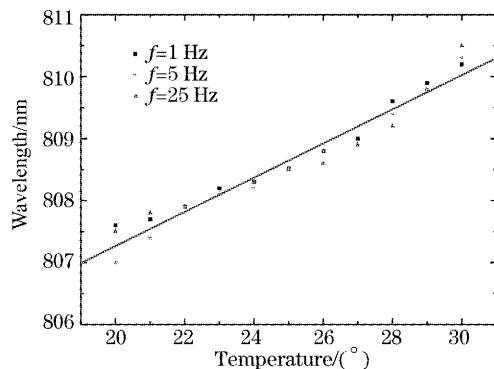


图6 激光二极管输出的峰值波长与温度的函数关系  
Fig. 6 The dependence of peak wavelength of on the temperature

激光二极管工作温度下激光器的输出以及不同工作频率下相同工作温度下激光器的输出。

图 7 为激光二极管工作在不同温度下激光器的输出。测试条件为：腔长为 220 mm，采用平凹腔，后腔镜曲率半径  $R = 500$  mm，输出镜耦合透过率  $T = 28\%$ ，激光二极管工作频率 6 Hz。可见激光二极管工作温度在 21~24 °C 之间变化时，能量输出的差异很小。而在激光二极管工作温度为 18 °C，尤其是 28 °C 时，能量输出下降。这一结果与前测量的波长变化一致。由于受到温差电致冷器制冷功率的限制，没有进一步提高器件的工作频率进行试验。图 8 是激光二极管工作频率分别为 6 Hz 和 25 Hz 时的激光器输出。此时采用平平谐振腔，输出镜耦合透过率为 28%，激光二极管的工作温度为 25 °C。可见在工作频率 25 Hz 时，激光器的输出下降，斜效率降低。

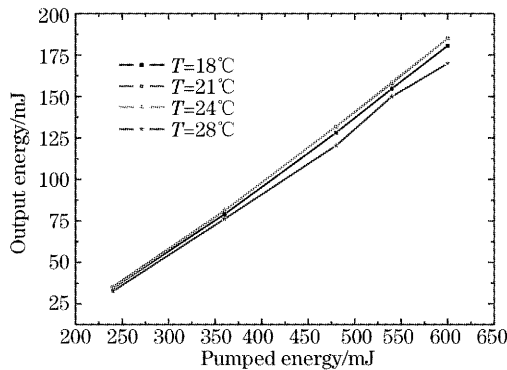


图 7 不同激光二极管工作温度下激光器的输出能量  
Fig. 7 Output energy versus pumped energy at different LD working temperature

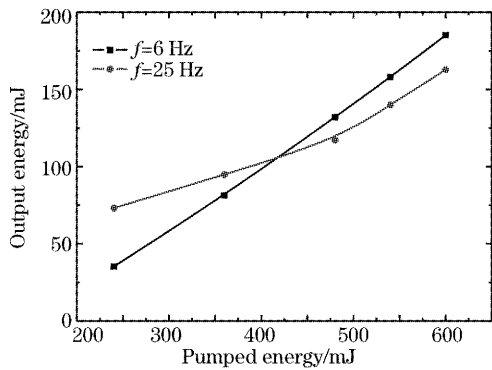


图 8 激光二极管工作频率 6 Hz 和 25 Hz 时激光器的输出性能  
Fig. 8 Output energy versus pumped energy while LD frequency is 6 Hz and 25 Hz

从图 3 晶体横截面内  $y$  方向的温度分布来看，晶体可以近似等效为一偏心的正柱透镜。我们把它简单分解为两部分来理解，一部分是线性部分，当振

荡光通过晶体后，会在子午面内产生偏转。随着抽运能量的增加，偏转角增大。例如：器件工作在 25 Hz 下，晶体的冷却温度为 21°，激光二极管的工作温度为 25°，工作电流为 60 A 时，经过实验测量此时产生的线性偏转角为 -1.8 mrad。另一部分是二次抛物线部分，产生偏心的热透镜。我们开展了一系列的工作来研究热效应的影响。

首先是腔长对激光器输出性能的影响。测试条件为：平平谐振腔，25 Hz，工作温度 25 °C，抽运头中心距后腔镜约 60 mm，输出镜耦合透过率为  $T = 28\%$ 。图 9 给出了测量结果。可见在腔长 150 mm 输出为最佳。同时虽然激光器工作腔长不同，但是激光器的阈值电流相差不大，输出的光斑质量也相差不大。

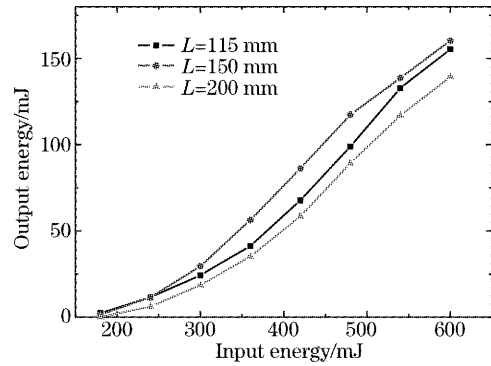


图 9 不同腔长下激光器的输出性能  
Fig. 9 Output energy versus pumping energy at different cavity length

由于热致退偏的作用，振荡光通过晶体上下部分时会产生不同的退偏损耗，使得调 Q 激光器的光束质量变坏，输出下降。工作频率越高，抽运能量越

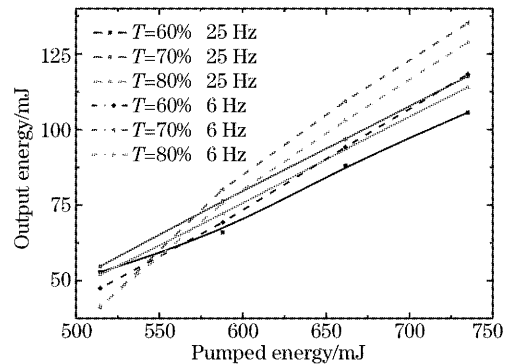


图 10 在不同的输出镜耦合透过率下，激光器在 6 Hz 和 25 Hz 下的输出性能  
Fig. 10 Output energy versus pumped energy with different transmissivities of output coupler and LD frequency is 6 Hz and 25 Hz respectively

大,这种现象越明显。图10、图11中给出了不同工作频率下、不同输出镜耦合透过率下激光器的调Q输出以及调Q波形,我们在工作频率 $f=6\text{ Hz}$ 下,激光二极管的抽运脉宽为 $245\ \mu\text{s}$ ,得到了斜效率为44.3%的多模调Q输出,最大输出能量为135 mJ,光光效率为18.4%,插头效率为11.0%;而在工作频率 $f=25\text{ Hz}$ 时,得到斜效率为28.4%的多模调Q输出,最大输出能量为118 mJ,光光效率为16%,插头效率为9.6%。图12中则给出了在工作频率为6 Hz和25 Hz情况下,用黑相纸在距输出腔镜约30 cm的地方接收的近场衍射光斑(为了显示清楚,图片均作了反色处理)。同时我们采用军标套孔法测量了工作频率 $f=6\text{ Hz}$ 、输出镜耦合透过率 $T=70\%$ 时调Q输出的发散角,光束发散角在1.5 mrad以下。在工作频率25 Hz时,调Q输出的近场光斑下部有缺损,能量分布重心出现了偏移,同时光斑中心出现了一个很强的区域,而这与抽运光分布场的中心强区相呼应。显然因为在晶体不同区域间存在不同的退偏损耗,导致了输出光场的畸变。而此时测得光束发散角在 $2\sim 3\text{ mrad}$ 。

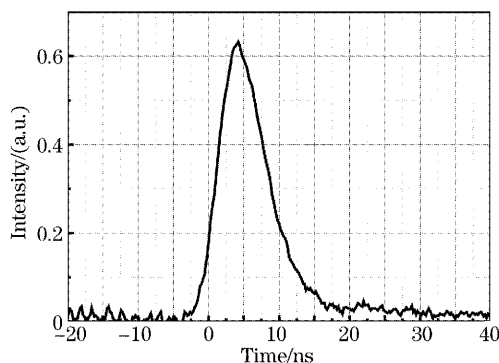


图11 调Q脉冲波形

Fig. 11 Q-switch pulse profile

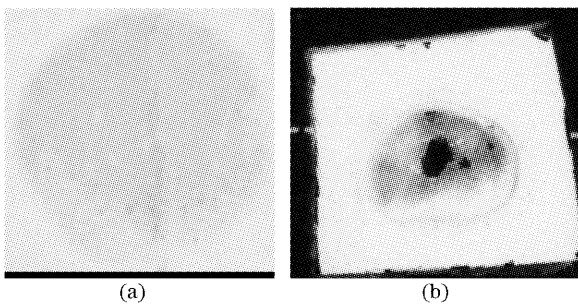


图12 激光器多模调Q输出的近场衍射光斑。

工作频率6 Hz (a), 25 Hz (b)

Fig. 12 Spatial profile of a multimode Q-switch output beam. LD frequency is 6 Hz (a), 25 Hz (b)

为此我们也初步探讨是否能采用合适的谐振

腔,较高频率下工作仍能得到高质量的输出。我们比较了在采用平平和平凹两种谐振腔,腔内插入起偏器的状态下,器件的输出情况,见图13。采用曲率半径为1 m的平凹腔,器件工作频率在25 Hz的输出与采用平平腔工作频率在6 Hz时的输出相等。可见这种激光器在低频工作时,直接采用平平直腔就可以得到光束质量好、效率高的多模输出。由于这种同心抽运同心冷却的抽运结构,抽运光场与谐振腔基模之间匹配度高,在工作频率增加时,虽然热效应加剧,但是选用合适的谐振腔,仍能得到光束质量好、基模提取效率高的输出,这部分的研究工作有待进一步开展。

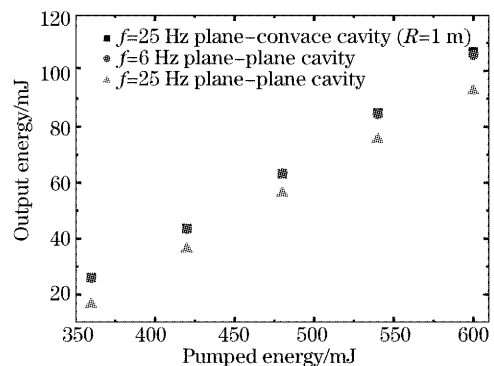


图13 在腔内插入起偏器,不同腔形下激光器的输出(输出镜耦合透过率为70%)

Fig. 13 Laser output with different cavity when polarizer is inserted into the cavity transmissivity of output coupler is 70%

## 4 结 论

采用直接紧包抽运的方式,减小抽运损耗,提高了抽运效率。同时采用同心抽运的棒状结构,晶体内的增益场与谐振腔基模实现了良好的匹配。而采用板状传导冷却的结构,虽然可以通过设计特殊的谐振腔或者整形得到高光束质量的输出,但是同心抽运同心冷却的结构简单,易于得到良好的光束质量和大能量输出,基模提取效率高。这种激光器结构简单,适宜采用传导方式冷却,整机紧凑,高效,体积小,重量轻,特别适用于机载、星载的要求。

文中针对这种采用同心抽运、同心冷却、紧包抽运结构的激光二极管侧抽运Nd:YAG激光器进行了详细的实验研究。在工作频率 $f=6\text{ Hz}$ 下,得到了斜效率为44.3%的多模调Q输出,最大输出能量为135 mJ,光光效率为18.4%,插头效率为11.0%,光束发散角小于1.5 mrad;而在工作频率 $f=25\text{ Hz}$

时,得到斜效率为 28.4%的多模调 Q 输出,最大输出能量为 118 mJ,光光效率为 16%,插头效率为 9.6%。而激光二极管的温度特性对器件的稳定工作影响很大,须对其提出较为严格的控温要求。

### 参 考 文 献

- 1 Jack L. Buffon. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft[C]. *Proc. IEEE*, 1989, **77**(3): 463~477
- 2 Thomas J. McGee, Dale Richter. A compact efficient Lidar instrument for the measurement of ozone profiles from them SOFIA upper deck [C]. *Proc. SOFIA Upper Deck Science Opportunities Workshop, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA*, 2004. 66~68
- 3 DGolla, S. Knoke, W. Schone. 300 W CW diode-laser side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10): 1148~1150
- 4 Shuichi Fujikawa, Keisuke Furuta, Koji Yasui. 28% electrical-efficiency operation of a diode-side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9): 602~604
- 5 Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto *et al.*. 208-W TEM<sub>00</sub> operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **25**(26): 79~681
- 6 D. L. Yu, D. Y. Tang. Experimental study of a high-power CW side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2003, **35**(1): 37~42
- 7 Chen lin, Hou Xia, Lu yutian. The method of LDA side-pumping: analog calculationand evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 825~828 (in Chinese)
- 8 谌 霖, 侯 霞, 陆雨田. 激光二极管阵列侧面直接抽运方式的模拟计算和效果评估[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 825~828
- 8 Hou Xia, Lu Yutian, Hu Qiquan. Diode side-pumped enfolded cavity Nd:YAG lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1350~1352 (in Chinese)
- 9 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
- 9 Junqing Meng, Weibiao Chen, Xia Hou *et al.*. Comparison of different side-pumped configurations for high power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 538~540
- 10 Zhang Hua, Xu Shixiang, Fan Dianyuan. Pumping energy distribution in rod amplifier calculated with the Monte Carlo method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1601~1608 (in Chinese)
- 10 张 华, 徐世祥, 范滇元. 用蒙特卡罗方法计算棒状放大器内的抽运能量分布[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1601~1608
- 11 Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode bars[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 58~62 (in Chinese)
- 11 赵 鸿, 姜东升, 王建军. 二极管侧面抽运条件下工作物质增益分布特性研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 58~62
- 12 Li Chenren, Song Changlie, Li Shufeng *et al.*. Experimental investigation of the change of semiconductor laser output wavelength corresponding to operation current[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 144~147 (in Chinese)
- 12 李成仁, 宋昌烈, 李淑凤 等. 半导体激光器输出波长随工作电流变化的实验研究[J]. *红外激光工程*, 2003, **32**(2): 144~147