

# 50 W 量级双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>基模固体激光振荡器

赵智刚 董延涛 潘孙强 刘崇\* 项震 陈军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 报道了一台输出功率达 50 W 量级的采用 808 nm 高功率激光二极管双端抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体基模固体激光振荡器。双端抽运结构和复合晶体的采用有效地降低了激光晶体中的热效应,可在晶体中获得更加均匀的热分布和增益分布。使用非对称平面腔动态稳定腔结构,使激光器的两个稳定区分离,并使其运行在稳定区 I 中,这样不仅可以进行高功率抽运,而且可以获得很低的失调灵敏度。对谐振腔腔长进行优化后,在抽运功率约 104 W 时获得了最高 51.2 W 的基模连续激光输出,基模光光转换效率达 49.2%;通过在腔内插入声光调 Q 器件,获得了重复频率在 50~600 kHz 之间连续可调的脉冲激光输出。重复频率在 100~600 kHz 之间时,平均输出功率可基本稳定在 49 W,脉冲宽度从 18.2 ns 增加到 85 ns;重复频率 50 kHz 时,平均输出功率 43.2 W,脉冲宽度 13.5 ns,峰值功率为 64 kW。

**关键词** 激光器;双端抽运;复合晶体;动态稳定腔;高重复频率

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0902001

## 50 W Class Double-End-Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> TEM<sub>00</sub> Mode Solid State Laser Oscillator

Zhao Zhigang Dong Yantao Pan Sunqiang Liu Chong Xiang Zhen Chen Jun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A 50 W class, high power 808 nm laser diodes double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystal laser oscillator is reported. The adoption of double-end-pumping configuration and composite crystal can effectively alleviate thermal effect and achieve more uniform thermal and gain distributions in the laser crystal. Asymmetrical plane-plane dynamically stable resonator is employed, which can make the two stable zones separated. Making the laser operated in stable zone I, we can pump the laser crystal with high pump power and get very small misalignment sensitivity, which are favorable for high power output and resonator's mechanical stability. After optimizing the length of the two cavity arms, we obtain 51.2 W continuous-wave (CW) TEM<sub>00</sub> mode laser output with about 104 W pump power, corresponding to an optical-to-optical efficiency of 49.2%. With an acousto-optic (AO) Q-switch inserted into the resonator, pulsed laser can be obtained within the pulse repetition rate range of 50~600 kHz. Within the pulse repetition rate range of 100~600 kHz, the average output power is stable at 49 W and the pulse width changes from 18.2 ns to 85 ns. At a pulse repetition rate of 50 kHz, the average output power reduces to 43.2 W with pulse width of 13.5 ns and peak power of 64 kW.

**Key words** lasers; double-end pumping; composite crystal; dynamically stable resonators; high repetition rate

**OCIS codes** 140.3425; 140.3480; 140.3580

## 1 引 言

由于具有转换效率高、热负载小、寿命长、结构紧凑以及良好的可靠性等优点,激光二极管端面抽

运的全固态激光器已成为当前激光技术领域的研究热点<sup>[1~7]</sup>。端面抽运方式可以在激光晶体中提供很高的抽运功率密度,使抽运光模式和振荡激光模式

**收稿日期**: 2011-03-25; **收到修改稿日期**: 2011-05-13

**基金项目**: 国家自然科学基金(60908013)和浙江省重大科技专项(2009C14036)资助课题。

**作者简介**: 赵智刚(1984—),男,博士研究生,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: zzg4298@163.com

**导师简介**: 陈军(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。

E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: chongliu78@hotmail.com

得到很好的空间重合,非常适合产生基模运转的激光。但是在高功率抽运时,由于热致球差和热致衍射损耗等的影响,会使输出的基模激光光束质量严重恶化并降低基模的光光转换效率。为此,人们从抽运结构和激光晶体本身着手,一方面提出了双端抽运方式使抽运光同时从晶体的两端入射,另一方面引入了键合晶体作为增益介质来缓解端面变形引起的热透镜效应,从而在晶体内获得更加均匀的增益分布和热分布,使基模输出功率有了较大的提升<sup>[8~12]</sup>。

掺钕钒酸钇(Nd:YVO<sub>4</sub>)和钒酸钷(Nd:GdVO<sub>4</sub>)这两种晶体由于具有适中的上能级寿命,因此非常适于用作高重复频率激光器的增益介质。近年来,赵智刚等<sup>[8]</sup>使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体进行双端抽运获得了 34 W 的连续基模激光输出,晶体尺寸为 3 mm×3 mm×(2+11+2) mm; Yan 等<sup>[9]</sup>使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体进行双端抽运获得了连续 40 W、高重复频率调 Q 38 W 的基模输出功率,晶体尺寸为 3 mm×3 mm×(2+16+2) mm; Li 等<sup>[10]</sup>使用两块 Nd:GdVO<sub>4</sub> 复合晶体,获得了连续 46 W 的基模激光输出,他们使用的抽运源波长为 879 nm 且两块晶体尺寸为 3 mm×3 mm×(2+10) mm,这种直接抽运技术可以使激光晶体热效应进一步减弱。Wang 等<sup>[11]</sup>对 Nd:YVO<sub>4</sub> 进行双端抽运,在入射功率为 88 W 时,获得了 44.5 W 的基模激光输出; McDonagh 等<sup>[12]</sup>使用波长为 888 nm 的高功率激光二极管双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,在抽运功率 108 W 时获得了 60 W 的连续基模激光输出功率,且晶体尺寸为 4 mm×4 mm×30 mm,此结果为目前端面抽运单棒振荡器的最好结果。综上可知,目前就端面抽运单棒振荡器而言,从国内情况来看,还未见有基模输出功率超过 50 W 的报道;而国外 60 W 的报道也是在采用了直接抽运技术与较大尺寸晶体才实现的,而这些技术的采用都会明显增加激光振荡器的成本。

本文报道了双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体基模固体激光器的最新进展。使用两个输出波长为 808 nm 的激光二极管双端抽运单块 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体,并基于平平非对称腔结构使激光器工作在可允许更高抽运功率的动态稳定区 I,最终在约 104 W 抽运功率下实现了基模连续输出,功率最高可达 51.2 W,基模的光光转换效率为 49.2%。结合声光(AO)调 Q 器件以及外部信号发生器后,实现了在 50~600 kHz 的高脉冲重复频率下的稳定调 Q 激光输出。

## 2 实验装置

实验中采用的装置如图 1 所示。抽运源为德国 DILAS 公司生产的两个高功率光纤耦合输出的半导体激光器,光纤端面直径为 400 μm,数值孔径(NA)为 0.22,标称最高输出功率为 50 W(但在实际应用中满负荷运转时可超过此值),输出激光的中心波长为 808 nm,通过调整温控设备的温度可以调节其中心波长,以达到与晶体吸收峰的有效匹配。光纤耦合输出的抽运光经由两个焦距分别为 18.5 和 37 mm 的透镜组成的成像系统,并透过双色镜后进入激光晶体,最终形成的抽运光斑直径可通过调节耦合系统参量进行调整。两个双色镜面向成像系统的一面镀有对 808 nm 的高透膜,面向晶体的一面镀有对 808 nm 的高透膜和对 1064 nm 的高反膜。为了减小因热效应而引起的晶体端面形变,采用了双端键合的 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体,其大小为 3 mm×3 mm×(2+16+2) mm, Nd<sup>3+</sup> 掺杂原子数分数为 0.3%。晶体的两个端面均镀有对 808 nm 和 1064 nm 的高透膜。为了有效地冷却晶体,将其四周用厚度为 0.1 mm 的铝箔包裹后放置于紫铜制作的热沉当中用循环水进行冷却,温度设定在 20 ℃。高反镜 HR 镀有 1064 nm 高反膜,输出耦合镜(OC)在 1064 nm 处的透射率 T=50%。这样,就由高反镜、两个双色镜以及输出耦合镜形成了“U”型谐振腔。采用这样的谐振腔结构,在实验中可以方便地调节谐振腔的各个参数,并且由于均采用平面镜,所以不必考虑由曲率镜像散带来的在子午面和弧矢面上稳区分离的问题<sup>[13]</sup>。声光 Q 开关通光方向长度为 10 mm,由射频频率为 41 MHz,射频功率为 15 W 的声光驱动电源驱动,调制重复频率在 1~600 kHz 范围内连续可调,且可调节 Q 开关的占空比进而调节其开关门时间。

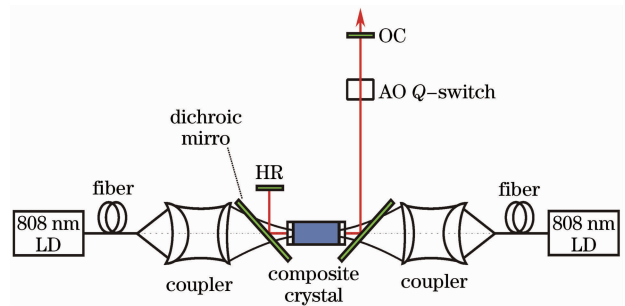


图 1 双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体激光振荡器实验装置  
Fig. 1 Experimental setup for double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystal laser oscillator

### 3 数值计算分析

双端键合激光晶体受到双端高功率抽运时,其内部将沉积大量废热,尤其是当抽运进行而激光没有输出的时候,这样就形成了严重的热透镜以及热球差效应。为了高效地获得高功率基模激光输出,就必须对这些热效应进行有效的规避和合理的利用。使用复合晶体就是一种有效的管理和规避热效应的手段。复合晶体是由一块激光晶体和一块或两块纯的非掺杂同质基底材料键合而成的,由于不掺杂晶体能够起到热沉的作用,利于晶体更好地散热,有效地改善了晶体中心和侧面的温度梯度,减小了由端面变形引起的热透镜效应,因此更有利于激光

器的稳定及高功率运转。对双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 普通晶体和复合晶体内的温度分布进行了计算,计算方法参照文献[14]中给出的方法,计算参数为:晶体尺寸 3 mm×3 mm×(2+16+2) mm,键合长度 2 mm,掺杂原子数分数 0.3%,双端抽运功率各 50 W,抽运波长 808 nm,吸收系数 1.84 cm<sup>-1</sup>,抽运光半径 0.5 mm,冷却温度 300 K。计算结果如图 2 所示,其中图 2(a)为晶体纵向方向的温度分布,图 2(b)为晶体横截面内的温度分布。由图 2 可见键合晶体的引入的确使得晶体内的温度分布变得更加平滑,尤其是在晶体的两个端面处,这大大降低了晶体端面的损伤概率。

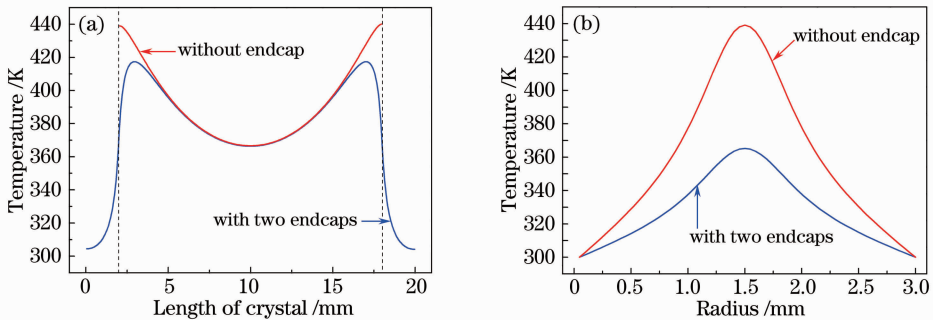


图 2 晶体中的温度分布情况。(a) 纵向分布;(b) 截面内分布

Fig. 2 Temperature distribution in crystal. (a) Longitudinal; (b) transverse

谐振腔的设计采用非对称平平腔结构<sup>[15]</sup>,通过调节抽运功率和设计谐振腔的参数使其达到动态稳定,这样的谐振腔叫作动态稳定腔(DSR)。在 20 世纪 80 年代中后期到 90 年代初期,Magni 等<sup>[16~19]</sup>就已经对这种大功率基模谐振腔所具有的特性及其设计方法进行了细致详实的研究,并指出 DSR 具有以下特性:首先,DSR 具有两个稳定区,在每一个稳定区中晶体内的基模光斑半径都有一个最小值  $w_0$ ,而且这两个稳定区的  $w_0$  是相同的;其次,如果将每一个稳定区所对应的光焦度的范围称为激光器工作的动态范围  $\Delta D$ ,那么这两个稳定区的动态范围也是相等的,而且满足  $w_0^2 \Delta D = 2\lambda/\pi$ ;最后,这两个稳定区具有截然不同的失调灵敏度,而且工作于稳区 I 的谐振腔对外围机械扰动或者是腔镜的失调更加不敏感,从而更容易满足实际工作要求。基于此,在设计谐振腔时,为了有效地利用 DSR 的这些特性并获得高功率的基模激光输出,就应该尽量使设计的谐振腔满足以下条件<sup>[20~22]</sup>:1) 晶体中的基模尺寸要尽可能大,从而达到高的光束填充因子,进而保证高效基模激光输出,但随着  $w_0$  的增加,谐振腔可以工作的稳定区范围  $\Delta D$  却随之减小。因此在实际情况

中,要根据具体的激光器工作条件来进行选择。2) 尽可能使谐振腔工作于稳定区的中央,因为在此处晶体内的基模模体积对热透镜焦距变化最不敏感,可以减小激光器输出功率的不稳定性。3) 使激光器工作于稳区 I 中,这样可以使谐振腔对外围的机械扰动或者腔镜的失调不那么敏感,增加激光器在实际操作中的机械稳定性。关于具体的设计过程,可以参阅文献[22]。图 3 给出对两臂长度分别

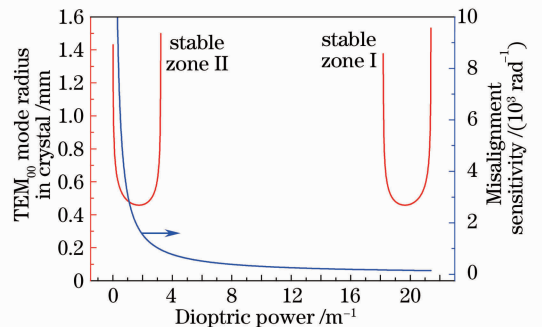


图 3 激光晶体内基模光斑半径和激光器失调灵敏度随热透镜光焦度的变化关系  
Fig. 3 Variation of TEM<sub>00</sub> mode radius in crystal and misalignment sensitivity with the change of thermal lens dioptric power

为 310 和 55 mm 的平平谐振腔的基模稳定区及谐振腔失调灵敏度的计算结果,从中可见,当激光器工作在稳定区 I 时,既能使用高抽运功率对其进行抽运,又能保证激光器具有很低的失调灵敏度,从而增加其机械稳定性。

#### 4 实验结果及分析

实验中使用以色列 Ophir 公司生产的激光功率计对输出功率进行监测;使用快速光电二极管和泰克公司带宽为 500 MHz 的示波器对不同脉冲重复频率下的脉冲宽度和脉冲质量进行监测;使用美国 Photon 公司生产的扫描狭缝激光光束轮廓仪测量光束的空间分布。

实验中,首先将谐振腔两臂腔长均置为最短,测量多模输出功率结果;然后对腔长进行优化,并将其固定在长臂  $L_1 = 310$  mm,短臂  $L_2 = 55$  mm。图 4(a)给出了这两种情况下的连续输出功率随抽运电流的

变化情况:在短腔多模情况下,输出功率随抽运电流呈单调增加趋势,在双端抽运电流均为 74 A 时,可输出最高 66 W 的多模激光;当对谐振腔腔长进行优化之后,在双端抽运电流均为 66 A(此时总抽运功率约为 104 W)时,基模输出功率可达 51.2 W,基模光光转换效率为 46.5%。从图中还可以看到,输出功率并不是随着抽运电流的增加而单调上升的,在对应抽运电流为 38~44 A 之间时存在一个输出功率凹陷区域,这是因为在这些抽运电流对应的热透镜焦距处,谐振腔是处于非稳腔结构的,所以输出功率下降;但是输出功率没有因为此时谐振腔处于非稳腔结构而降为零,这又是由于高功率抽运条件下热透镜的球差效应所引起的。图 4(b)为谐振腔  $g$  参数的变化情况以及 66 A 时腔内光束半径的分布图。图 5 为输出连续功率 50 W 时对应光斑的二维和三维分布图。

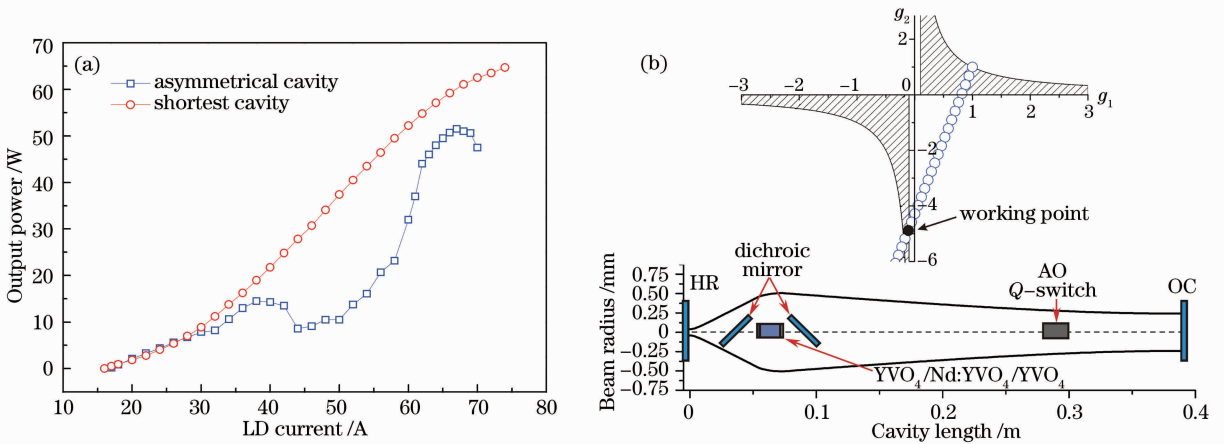


图 4 (a) 激光器连续输出功率随抽运电流的变化关系;(b) 谐振腔的  $g$  参数图及抽运电流为 66 A 时腔内光束半径分布示意图

Fig. 4 (a) CW output power versus pump current; (b)  $g$ -parameter and intracavity beam radius distribution

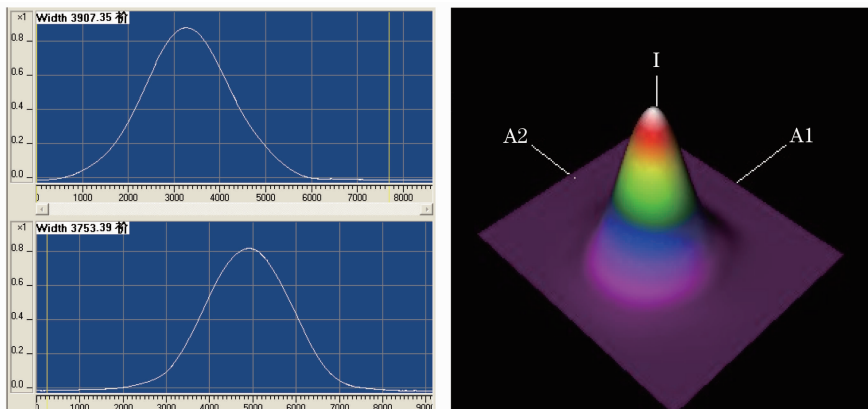


图 5 连续输出功率为 50 W 时的光斑空间分布图

Fig. 5 Spatial form of laser with TEM<sub>00</sub> mode CW output power of 50 W



之后,将声光调 Q 器件放入谐振腔内,使激光器工作于脉冲方式。图 6(a)给出了双端总抽运电流为 66 A、脉冲重复频率在 50~600 kHz 之间变化时,激光器的平均输出功率和脉冲宽度的变化情况;图 6(b)给出相应的峰值功率随脉冲重复频率的变化情况。从图中可以看出,当脉冲重复频率在 100~600 kHz 之间时,平均输出功率可基本稳定在 49 W 左右,而脉冲宽度从 18.2 ns 增加到 85 ns,这是由于重复频率

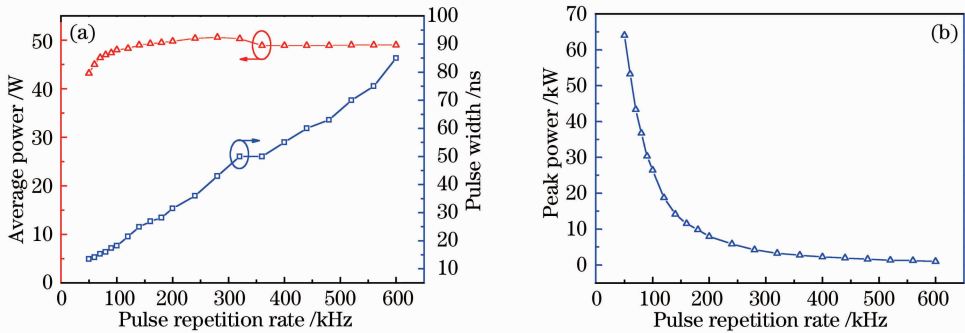


图 6 (a) 脉冲宽度和平均功率随脉冲重复频率的变化情况;(b) 峰值功率随脉冲重复频率的变化情况

Fig. 6 (a) Pulse width and average output power versus pulse repetition rate; (b) average output power versus pulse repetition rate

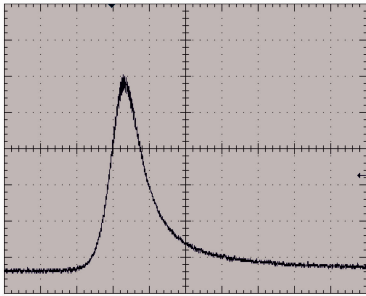


图 7 重复频率为 600 kHz 时的单脉冲图样

Fig. 7 Pulse shape with repetition rate of 600 kHz

## 5 结 论

双端抽运结构和复合晶体均能有效地改善激光晶体内的热分布状况,获得更好的增益分布,使得激光器的整体性能提升。基于单块 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体,采用双端抽运结构、非对称平凹腔型设计,并使其工作于抽运功率较高的稳定区 I,获得了平均功率 50 W 量级的基模激光输出,基模光光转换效率接近 50%。

## 参 考 文 献

1 Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous wave single frequency Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser at 1064 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197  
张铁犁,姚建铨,王 鹏等. 端面抽运高功率连续单频 1064 nm

的增加使得激光单脉冲储能时间降低,进而使得反转粒子数与阈值反转粒子数的比值下降,从而影响激光脉冲的上升沿时间,使得脉冲宽度变宽<sup>[23]</sup>;当脉冲重复频率为 50 kHz 时,平均输出功率为 43.2 W,脉冲宽度为 13.5 ns,峰值功率为 64 kW。为了保证激光谐振腔内元件的安全,没有在更低重复频率下进行实验。图 7 给出的是在脉冲重复频率为 600 kHz 时,由示波器采集的单脉冲宽度测试图形。

Nd:YVO<sub>4</sub> 环形腔激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1194~1197  
2 Wang Sha, Chen Jun, Liu Chong *et al.*. Theoretical and experimental research of end pumped quasi-three-level Yb:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 23~27  
汪 莎,陈 军,刘 崇等. 纵向抽运准三能级 Yb:YAG 激光器的理论模型及实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 23~27  
3 Liu Huan, Gong Mali. Compact LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> intracavity frequency-tripled 355 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1341~1346  
刘 欢,巩马理. 紧凑型激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 内腔三倍频 355 nm 紫外激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1341~1346  
4 Li Fengqin, Yu Lin, Shen Yumei *et al.*. All-solid-state CW 12.9 W TEM<sub>00</sub> mode green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1332~1336  
李凤琴,于 琳,申玉梅等. 输出功率 12.9 W 的全固态连续 TEM<sub>00</sub> 模绿光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1332~1336  
5 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618  
周寿桓,赵 鸿,唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618  
6 Hou Junyan, Chen Weibiao, Wang Yuefeng. Optimal design of high power high repetition laser diode dual-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with LAS-CAD software[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1673~1677  
侯军燕,陈卫标,汪岳峰. 基于 LAS-CAD 优化设计的高功率高重复频率激光二极管双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1673~1677  
7 Hou Junyan, Shu Shijiang, Wang Yuefeng *et al.*. High power high beam quality LD dual-end-pumped Z folded resonator Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2299~2305  
侯军燕,舒仕江,汪岳峰等. 激光二极管双端抽运高功率高光束质量 Z 型折叠腔 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2299~2305

- 8 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang *et al.*. Investigation on LD double-end-pumped high power Q-switched YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub> fundamental mode solid state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2409~2414  
赵智刚,董延涛,潘孙强等. LD双端抽运YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub>复合晶体的高功率调Q基模固体激光器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2409~2414
- 9 X. P. Yan, Q. Liu, M. Gong *et al.*. Over 8 W high peak power UV laser with a high power Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator and the compact extra-cavity sum-frequency mixing[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(2): 93~97
- 10 Li Xudong, Xin Yu, Fei Chen *et al.*. Power scaling of directly dual-end-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser using grown-together composite crystal[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 7407~7414
- 11 Charles X. Wang, Gary Y. Wang, Aclé V. Hicks *et al.*. High-power Q-switched TEM<sub>00</sub> mode diode-pumped solid state lasers with 30 W output power at 355 nm[C]. *SPIE*, 2006, **6100**: 610019
- 12 Louis McDonagh, Richard Wallenstein, Ralf Knappe *et al.*. High efficiency 60 W TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator pumped at 888 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3297~3299
- 13 Hou Junyan, Wang Yuefeng. Research on stability of LD dual-end-pumped folded resonator Nd:YVO<sub>4</sub> master oscillator[J]. *Infrared*, 2009, **30**(1): 36~40  
侯军燕,汪岳峰. LD双端端面抽运Nd:YVO<sub>4</sub>折叠腔主振荡器的稳定性研究[J]. *红外*, 2009, **30**(1): 36~40
- 14 Pan Sunqiang, Liu Chong, Zhao Zhigang *et al.*. Thermal effects and thermal focal length measurement of laser diode end-pumped solid-state lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2445~2450  
潘孙强,刘崇,赵智刚等. 激光二极管端面抽运固体激光器的热效应和热透镜焦距测量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2445~2450
- 15 Chong Liu, Thomas Riesbeck, Xin Wang *et al.*. Asymmetric TEM<sub>00</sub>-mode cavity for birefringence compensated two rod solid state lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(11): 1107~1115
- 16 Vittorio Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 107~117
- 17 Sandro de Silvestri, Aolo Laporta, Vittorio Magni. Pump power stability range of single-mode solid-state lasers with rod thermal lensing[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(11): 1999~2004
- 18 V. Magni, G. Valentini, S. de Silvestri. Recent developments in laser resonator design[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1991, **23**(9): 1105~1134
- 19 G. Cerullo, S. de Silvestri, V. Magni *et al.*. Output power limitations in CW single transverse mode Nd:YAG lasers with a rod of large cross-section[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1993, **25**(8): 489~500
- 20 T. Riesbeck. Generation of tailored pulse trains for efficient material processing by a high power MOPA system with birefringence compensation[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2008, **5**(3): 240~245
- 21 Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Influence of spherical aberration of the thermal lens on the mode profile of a large volume TEM<sub>00</sub>-mode resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1704~1708  
刘崇,葛剑虹,项震等. 热透镜的球差效应对大基模体积激光谐振腔模式的影响[J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1704~1708
- 22 Liu Chong. Investigation on High Power High Brightness Solid-State Lasers and Their Harmonic Generation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. 41~72  
刘崇. 大功率高亮度固体激光器及其谐波产生研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. 41~72
- 23 Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Liu Zejin *et al.*. Principles of Laser[M]. Jinan: Shandong University Press, 2003. 258~260  
王青圃,张行愚,刘泽金等. 激光原理[M]. 济南: 山东大学出版社, 2003. 258~260