

# 掠入射 Nd:YVO<sub>4</sub>板条结构皮秒激光放大器的实验研究

沈利洋 姜洪波 赵志刚 刘斌 王春华 项震 刘崇

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 基于可饱和吸收体和被动调 Q 微晶片种子源,对双通掠入射 Nd:YVO<sub>4</sub>板条放大器进行了实验研究。脉冲宽度为 90 ps、脉冲重复频率为 100 kHz、光束质量因子为 1.16 的激光作为种子源,功率从 100 μW 到 10 mW 可调,分别采用新型的液态金属和传统的薄钢膜作为板条放大器的热传导材料。测量结果显示,采用液态金属能大幅降低板条抽运面的温度。将液态金属作为板条放大器的导热材料,10 mW 的种子光源在抽运功率为 55 W 时,经过掠入射 Nd:YVO<sub>4</sub>板条双通放大,最终获得 13 W 激光输出,光光效率达到 23%,脉冲峰值功率为 1.2 MW,脉冲能量为 130 μJ,光束质量  $M_x^2=1.30, M_y^2=1.28$ 。

**关键词** 激光器;板条放大器;皮秒激光;微晶片;光束质量;侧面抽运

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1101004

## Experimental Study of Picosecond Laser Amplifier Based on Grazing Incidence Nd:YVO<sub>4</sub> Slab Geometry

Shen Lifeng Jiang Hongbo Zhao Zhigang Liu Bin Wang Chunhua  
Xiang Zhen Liu Chong

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

**Abstract** The experimental study of the double-pass grazing incidence Nd:YVO<sub>4</sub> slab amplifier is carried out based on a saturable absorber and passively Q-switched microchip seed laser. The microchip laser with pulse duration of 90 ps, repetition rate of 100 kHz and beam quality factor  $M^2=1.16$  acts as seed laser with varying output power from 100 μW to 10 mW. The new liquid pure metal grease and the traditional thin indium foil are used to conduct as the thermal contact material of the bounce amplifier, respectively. Experimental results show that the liquid pure metal grease conducted as the thermal contact material can significantly reduce the temperature of the slab pump face. An output power of 13 W is obtained with the liquid pure metal grease conducted as the thermal contact material for 10 mW seed power with pump power of 55 W at an optical-optical efficiency of 23%, achieving pulse peak power of 1.2 MW and pulse energy of 130 μJ. The beam quality factor is  $M_x^2=1.30, M_y^2=1.28$ .

**Key words** lasers; bounce amplifier; picosecond laser; microchip; beam quality; side pump

**OCIS codes** 140.3280; 140.3430; 140.2020

## 1 引言

高峰值功率、高重复频率、皮秒脉宽的全固态激光器,尤其是重复频率达 100 kHz,脉宽在 10 ps 量级的脉冲激光器,在微加工领域有着广泛应用<sup>[1-2]</sup>。主振荡功率放大(MOPA)结构是获得高功率高光束质量皮秒

收稿日期: 2016-07-01; 收到修改稿日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61575172)、浙江省自然科学基金(LZ15F050001)、中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室开放基金(2014HEL04)、中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 沈利洋(1991—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: shenlifengzero@zju.edu.cn

导师简介: 刘崇(1978—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事固体激光及非线性光学技术方面的研究。

E-mail: chongliu78@hotmail.com(通信联系人)

激光器的有效技术方案之一,振荡器获得低功率高光束质量的种子光源,放大器在提高增益的同时可以保持良好的光束质量。

在获得皮秒激光的 MOPA 结构中,激光振荡器的选择有很多,基于可饱和吸收体(SESAM)的被动调 Q 微晶片激光器是一种经济可行的方案。输出脉冲宽度可以从 16 ps 到亚纳秒<sup>[3]</sup>,脉冲重复频率可以满足上述 100 kHz 要求,并且脉冲重复频率和抽运功率呈线性关系,易于调节。空间结构的多通固体增益介质放大器可以实现高增益放大<sup>[4]</sup>,相对于棒状增益介质,板条型增益介质能有效减小介质内的热畸变与热应力<sup>[5]</sup>。板条介质的冷却面大、厚度薄、表面积体积比大,可以高效实现对晶体的散热,降低晶体中的温度梯度。

近几年,针对短脉宽、高增益、结构紧凑的多通板条放大器已经有了相关研究。Nawata 等<sup>[6]</sup>设计了一种相位共轭结构的 Nd:YVO<sub>4</sub> 双通板条放大器,在重复频率 0.33~1.0 MHz 时可以达到 2.8~6.8 MW 的峰值功率输出,能量提取效率在 34% 左右。孙哲等<sup>[7]</sup>设计了一种结构紧凑的半导体抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条双通放大器,在重复频率 20 kHz 时实现了平均功率为 6.3 W、脉冲宽度为 2.52 ns 的激光输出。虽然板条介质相比棒状介质在热管理方面更具优势,但是在高功率抽运情况下,热效应带来的晶体温度升高仍然是制约增益提高的一个主要因素,并且在已发表的文献中对这一问题的研究未见报道。

本文报道了一种采用基于 SESAM 被动调 Q 微晶片激光器作为主振荡器,掠入射板条作为激光放大器的 MOPA 结构,对放大器中板条的热效应进行了分析,将液态金属代替传统的钢膜作为导热材料,有效地降低了板条端面的温度。在放大器中,当抽运功率为 55 W 时,采用功率为 10 mW 的种子光,经过掠入射板条双通放大,获得了平均功率为 13 W、峰值功率为 1.2 MW、单脉冲能量为 130 μJ、光束质量因子  $M^2 \leq 1.3$  的激光输出。

## 2 实验装置

侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 掠入射板条放大器的结构示意图,如图 1 所示。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体板条沿 *a* 轴切割,掺杂摩尔分数为 1%,尺寸为 20 mm×5 mm×0.8 mm。坐标轴原点建立在板条晶体的中心位置,*x*、*y*、*z* 分别沿板条的宽度(*l*)、厚度(*h*)、长度(*d*) 方向,如图 1(a) 所示。抽运光沿 *x* 轴正方向入射,入射端面位于前侧面(*x* = -*l*/2 平面),如图 1(b) 所示。晶体通过上下两个大面(*y* = ±*h*/2) 与铜块接触进行散热,如图 1(c) 所示。为保证良好的接触传导,晶体和铜块之间需要加入热传导材料。

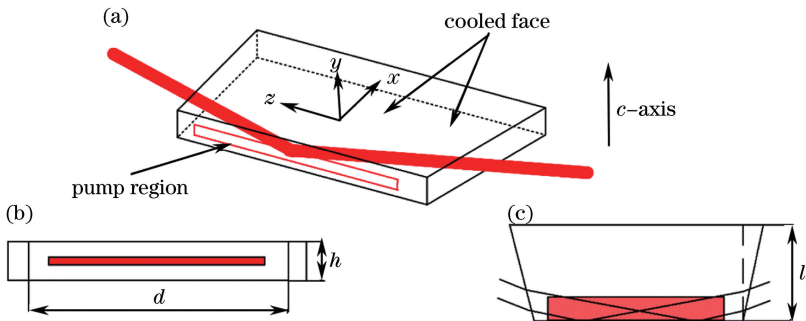


图 1 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条结构示意图。(a)板条由二极管巴条抽运,被流通水冷却;  
(b)*yz* 面,抽运区域的位置;(c)*xz* 面,光束在抽运面发生内全反射

Fig. 1 Schematic diagram of Nd:YVO<sub>4</sub> slab geometry. (a) Slab is pumped by diode bar and cooled by the circulating water; (b) *yz*-cut, location of pump region; (c) *xz*-cut, beam propagating in the gain medium which makes total internal reflection on the pump face

板条两个 5 mm×0.8 mm 的端面都镀有 1064 nm 的增透膜,两通光面切 26° 楔角形成梯形结构来抑制自激振荡。前表面(20 mm×0.8 mm)镀 808 nm 增透膜,后表面(22 mm×0.8 mm)镀 808 nm 全反膜。抽运源为总输出功率 55 W 的 808 nm 的二极管巴条,同时在快轴上通过柱透镜将抽运光的束腰聚焦到 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质前表面中心,输出激光为横电(TE)偏振,采用 808 nm 半波片将其偏振方向旋转 90°,横磁模(TM)偏振,使偏振态和 *c* 轴平行,提高板条对其吸收系数。

图 2 为 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光放大器的双通示意图,将脉冲宽度为 90 ps、脉冲重复频率为 100 kHz、光束质量  $M^2=1.16$  的低功率微晶片皮秒激光器作为种子源,调节半波片(HWP2)可以实现种子光输出功率在 0.1~10 mW 范围内可调。图 2 中,SL1( $f_{SL1}=700$  mm)和 SL2( $f_{SL2}=100$  mm)是球面透镜,HWP2,HWP3 和 HWP4 是 1064 nm 的半波片,PBS 是偏振分光片,FR 是法拉第旋光器,HR 是全反镜,HCL 是水平方向的聚焦透镜,VCL 是垂直方向的聚焦透镜(其中  $f_{HCL1}=500$  mm, $f_{VCL1}=40$  mm, $f_{VCL2}=100$  mm)。在实验中,种子激光经过 HCL1、VCL2 整型后的光斑束腰大小为 0.6 mm×0.12 mm。为了提高种子激光的单脉冲能量、提取效率和放大的总增益,减小热透镜和畸变效应,必须保证种子激光和抽运光的模式匹配。第一次入射板条的内部入射角是 4°,在这个角度下不仅能保证增益,而且能控制激光在水平方向上的畸变。第二次入射板条的内部入射角经计算是 6°,为了保证种子光在板条内第二通时光斑尺寸与第一通时基本一致,利用圆透镜(SL2)和两个全反镜(HR)构成的 4f 相传递系统,使激光再次掠入射板条双通放大。在板条的抽运面上,第二次入射板条的激光在 z 方向的投影距离会比第一次小一些,避免了激光边缘的畸变效应,保证了激光放大输出。

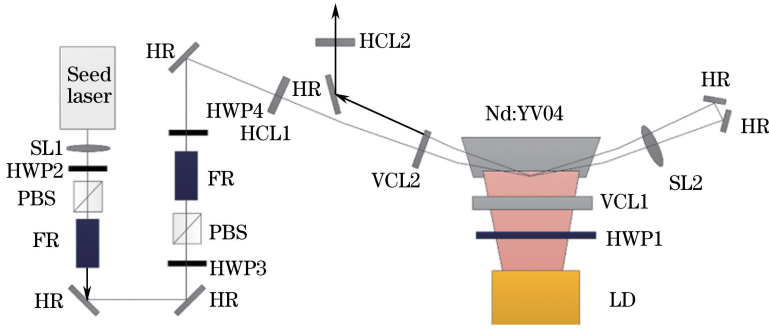


图 2 Nd:YVO<sub>4</sub>板条双通放大装置图

Fig. 2 Setup of the Nd:YVO<sub>4</sub> double-pass slab amplifier

### 3 热效应分析

掠入射结构利用高掺杂 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体对抽运光的强烈吸收,在抽运面浅层形成一段高反转粒子密度区域,结合大截面抽运,可以提供极高的单程增益,但缺点是热效应比较严重<sup>[8]</sup>。为了优化板条放大器的性能,需要对热效应进行分析。

采用连续的单巴条激光二极管进行侧面抽运,对于各向异性的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,板条的稳态热传导方程可以表示为<sup>[9]</sup>

$$K_x \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + K_y \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + K_z \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \alpha P_h(y, z) \exp \left[ -\alpha \left( x + \frac{l}{2} \right) \right] = 0, \quad (1)$$

$$P_h = \frac{\eta P_p}{A_0} \exp \left[ -2 \left( \frac{z^4}{\omega_z^4} + \frac{y^2}{\omega_y^2} \right) \right], \quad (2)$$

$$A_0 = \iint \exp \left[ -2 \left( \frac{z^4}{\omega_z^4} + \frac{y^2}{\omega_y^2} \right) \right] dz dy, \quad (3)$$

式中  $K_x=K_z=5.23$  W/(m·K) 分别是晶体沿 x 轴和 z 轴方向上的热传导系数, $K_y=5.1$  W/(m·K) 是晶体沿 y 轴方向上的热传导系数<sup>[10]</sup>, $P_h$  是板条抽运面上的热分布函数, $\eta$  是抽运光热转换效率,即板条吸收的抽运光转换成热的比例,抽运功率  $P_p=55$  W, $\omega_z$  和  $\omega_y$  是抽运光在水平和垂直方向上的光束半径,抽运的吸收系数  $\alpha=24$  cm<sup>-1</sup>。 $A_0$  是归一化超高斯分布光斑面积。

对于板条的边界条件,可认为晶体和铜块之间的热传导材料处于理想的导热状态中,即板条上下两个冷却的大面温度和水温是一致的。板条其余四边都与空气直接接触,其边界条件可由空气的温度和空气对流系数来确定。因此,上述传导方程的边界条件可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x}\left(\pm \frac{l}{2}, y, z\right)=\frac{h}{K_x}\left[T\left(\pm \frac{l}{2}, y, z\right)-T_f\right] \\ T\left(x, \pm \frac{h}{2}, z\right)=T_0 \\ \frac{\partial T}{\partial z}\left(x, y, \pm \frac{d}{2}\right)=\frac{h}{K_z}\left[T\left(x, y, \pm \frac{d}{2}\right)-T_f\right] \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $T_0$  和  $T_f$  分别是冷却水的温度和室内空气的温度,  $h$  是空气的对流换热系数。由上述的热传导方程和边界条件即可求解获得传导材料理想传热时板条的温度分布。

在实验中,理想的导热状态很难实现,但在板条和热沉之间放置热传导材料可以增强板条和热沉之间的热传导能力。传统的热传导材料为钢膜,但是,在这样一个厚度为 0.8 mm,表面体积比大的板条上施加一个较大且均匀的压力是比较困难的<sup>[11]</sup>,会增加板条破裂的风险。液态金属导热材料作为近年来新型的导热材料,其主要成分是以镓为基底的合金。导热系数达到 25 W/(m·K),密度为 6.2 g/mL,电阻为  $1.2 \times 10^{-7} \Omega$ ,工作温度范围大(-40~500 °C),在铜或不锈钢接触的过程中不会产生其他物质。激光晶体与热沉之间的热阻与压力无关,挥发率低于 0.001%,也不含有硅脂和有机挥发性物质,是理想的导热材料。

热效应对 Nd:YVO<sub>4</sub> 放大器的影响主要有两个方面:1) 热致波前畸变将影响激光的光束质量,激光介质内部的温度梯度会形成热透镜和热致畸变,热透镜效应改变了激光的传输特性,热致畸变效应引入的像差使光束质量退化;2) Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的增益系数会随着温度升高而下降。Delen 等<sup>[12]</sup>研究了晶体的温度和发射截面之间的关系,温度的上升会导致 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质受激发射截面的降低,从而导致增益系数的下降,因此在放大器中降低增益介质的温度具有非常重要的意义。在前期的研究中设计了一个单通的板条放大器结构<sup>[13]</sup>,针对钢膜和液态金属两种导热材料进行了对比实验。采用液态金属作为导热材料时,板条中心的端面温度明显小于采用 0.1 mm 厚度钢膜时的情况,明显提高了增益介质的散热能力。

为了更加直观地表明热效应对放大器增益特性的影响,通过实验验证了放大器的增益系数与激光介质温度的关系。种子光功率为 10 mW,双通经过板条介质进行放大,板条介质的抽运功率为 55 W。实验中通过改变晶体热沉的温度来改变晶体端面的温度,并通过热像仪(Ti27,Fluke Corporation)测量晶体端面温度的实际值,最后得到双通放大后的增益与晶体温度的关系,如图 3 所示。图 3 中纵坐标表示的增益为输出功率与输入功率的比值,横坐标为热像仪测量得到的晶体温度。由图 3 可以看出,当晶体温度从 340 K 降低到 324 K 时,放大器增益增加了 2.1 dB(~1.6 倍),说明晶体端面的温度对放大器增益有着显著的影响。

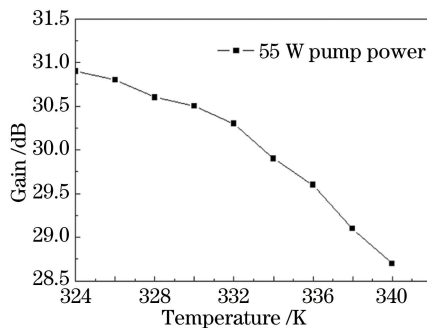


图 3 板条双通后增益随晶体温度的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of gain versus crystal temperature of slab double-pass bounce amplifier

## 4 实验结果和分析

实验研究了在不同传导材料下板条双通放大的增益特性。当种子功率为 10 mW、抽运功率为 55 W 时,采用液态金属作为导热材料,双通之后总功率随着抽运功率升高而升高,最高可以到达 13 W。而采用 0.1 mm 厚度的钢膜作为导热材料最高得到 7.1 W 的功率输出,并且在抽运功率大于 45 W 时,观察到如 Teppitaksak 等<sup>[14]</sup>提到的,输出功率有一个明显下降的拐点,如图 4 所示,主要原因是随着抽运功率的增加,板条内部的热功率逐渐增加,当抽运功率大于 45 W 后,采用钢膜作为导热材料,其换热能力有限,不足以实

现板条的散热,因此功率出现下降。由上述实验结果可知,采用液态金属作为热传导材料其换热能力明显优于传统的钢膜,并且采用液态金属作为导热材料,无需在晶体上施加比较大的均匀的压力,因此其实验性和操作性也比较强。后续的实验中,将液态金属代替钢膜作为板条和热沉之间的导热材料进行实验。

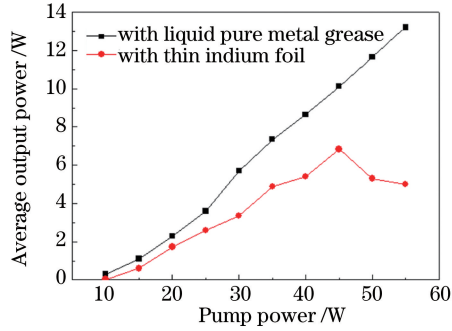


图 4 两种热传导材料下双通后的输出功率

Fig. 4 Output power from the double-pass bounce amplifier with two types of thermal contact material

对于半导体侧面抽运结构的激光放大器,抽运功率密度高,很容易会产生放大自发辐射(ASE)。如果增加多通放大的次数,就必须增加透镜和全反镜,可是这样在器件之间很容易引起自激振荡。为了抑制 ASE 和自激振荡,需要严格控制抽运功率密度,并且设计激光放大器的结构。因此,在实验中采用焦距  $f = 40 \text{ mm}$  的柱透镜(VCL1)对抽运光进行整形,获得了  $c$  轴方向上约  $200 \mu\text{m}$  增益区域,并没有进一步去压缩抽运区域。同时,成功地采用两级高消光比的光学隔离器和较少的透镜优化板条放大器结构,抑制了自激振荡,实现双通放大。图 5 所示为不同的抽运功率下不同的种子光双通的输出功率。在种子光功率为  $10 \text{ mW}$  时,  $55 \text{ W}$  的抽运功率下获得了  $13 \text{ W}$  的输出功率,峰值功率为  $1.2 \text{ MW}$ ,单脉冲能量为  $130 \mu\text{J}$ ,光光效率达到  $23\%$ 。在种子光功率为  $0.1 \text{ mW}$  时,  $55 \text{ W}$  的抽运功率下可以得到  $2.6 \text{ W}$  的输出功率,总增益为  $44 \text{ dB}$ 。

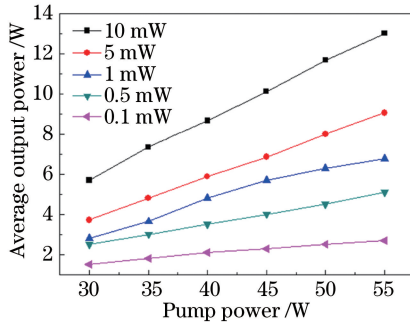


图 5 不同种子光双通后的输出功率

Fig. 5 Output power from the double-pass bounce amplifier with different seed powers

双通后测量激光在水平和垂直方向上的光束质量因子。在种子光功率  $10 \text{ mW}$ ,抽运功率  $55 \text{ W}$  时,最终输出激光功率  $13 \text{ W}$ ,水平方向光束质量因子  $M_x^2 = 1.30$ ,垂直方向光束质量因子  $M_y^2 = 1.28$ ,说明激光在双通后光束质量基本没有恶化。这主要是因为板条和紫铜热沉间的液态金属的良好导热,大大地降低了板条的温度,减少内部增益介质的温度梯度,保持了良好的光束质量。同时在激光光路的设计中,充分考虑了填充因子(激光光束和抽运光的比值),选择了在水平方向为  $0.7$  和垂直方向为  $0.6$  的填充因子,这样的模式匹配避免了抽运光边缘对激光造成畸变,同时也保证了比较高的提取效率和光束质量。采用快速光电二极管(Model 1434, New Focus)和示波器(DSA 71254, Tektronix)来测量输出激光的脉冲宽度,测量结果如图 6 所示。双通放大后激光的输出脉冲宽度约为  $107 \text{ ps}$ ,单脉冲能量  $130 \mu\text{J}$ ,对应的脉冲峰值功率  $1.2 \text{ MW}$ 。

## 5 结 论

采用基于 SESAM 被动调 Q 微晶片激光器作为主振荡器,掠入射板条作为激光放大器的 MOPA 结构,

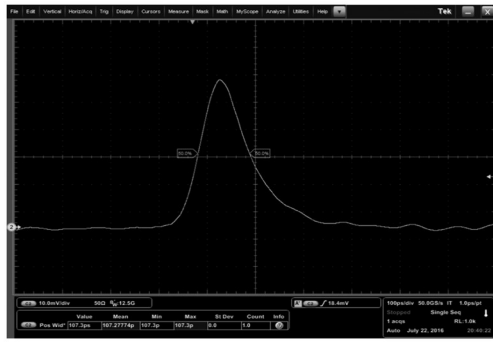


图 6 双通放大后的输出脉宽

Fig. 6 Output pulse width of the double-pass bounce amplifier

并对放大器中板条的热效应进行分析。将液态金属代替铜膜作为导热材料,使放大器获得了很好的热管理能力。对板条抽运区域的温度分布进行数值模拟,结果表明,采用液态金属能获得和理想情况下比较接近的换热能力。通过调节种子源的抽运功率,在 100 kHz 时获得平均功率为 10 mW、脉宽为 90 ps、光束质量  $M^2=1.16$  的基模种子激光。经过双通放大后,获得平均功率约为 13 W、单脉冲能量为 130  $\mu$ J 的激光输出,光光效率达到 23%,光束质量因子  $M_x^2=1.30, M_y^2=1.28$ 。基于微晶片激光器的板条放大器的 MOPA 结构有着简单、高效、成本较低的特点,如果再增加多通放大次数或级数,将获得窄脉宽、高峰值功率的输出,具有极大的工业应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Tang P H, Song R G, Chai G Z, *et al.* A study on TiN/AlN multilayer thin films prepared by pulsed laser ablation[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(6): 880-885.
- 2 C Erný P, Jelínková H, Zverev P G, *et al.* Solid state lasers with Raman frequency conversion [J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28(2): 113-143.
- 3 Spühler G J, Paschotta R, Fluck R, *et al.* Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(3): 376-388.
- 4 Tokita S, Kawanaka J, Izawa Y, *et al.* 23.7 W picosecond cryogenic-Yb:YAG multipass amplifier[J]. Optics Express, 2007, 15(7): 3955-61.
- 5 Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan, *et al.* Recent advances in high-power solid-state slab lasers[J]. Laser & Optronics Progress, 2005, 42(4): 33-36.  
张玲玲, 孟俊清, 黄 燕, 等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 33-36.
- 6 Nawata K, Okida M, Furuki K, *et al.* Sub-100 W picosecond output from a phase-conjugate Nd:YVO<sub>4</sub> bounce amplifier [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20816-20823.
- 7 Sun Zhe, Chen Xin, Jiang Menghua, *et al.* Compact side pumped double pass Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser amplifier[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2013, 24(11): 2111-2115.  
孙 哲, 陈 欣, 姜梦华, 等. 半导体抽运双通 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光放大器[J]. 光电子·激光, 2013(11): 2111-2115.
- 8 Blows J L, Omatsu T, Dawes J, *et al.* Heat generation in Nd:YVO with and without laser action[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 10(12): 1727-1729.
- 9 Wang Wanwei, Lei Hong, Guo Meng, *et al.* Thermal effect study of grazing-incidence amplifier chain[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 051009.  
王万祎, 雷 甸, 郭 猛, 等. 掠入射板条放大器链的热效应模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 051009.
- 10 Chen Z, Yan X, Jiang X, *et al.* The thermal effect in a grazing-incidence slab laser with the novel composite cooling method[J]. Optical and Quantum Electronics, 2009, 41(1): 27-38.
- 11 Wang Chunhua, Wang Weimin, Ma Yi, *et al.* Thin-disk laser at 515 nm with good beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2795-2798.  
王春华, 王卫民, 马 毅, 等. 高光束质量 515nm 薄片激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2795-2798.
- 12 Délen X, Balembois F, Georges P. Temperature dependence of the emission cross section of Nd:YVO<sub>4</sub> around 1064 nm

and consequences on laser operation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(5): 972-976.

- 13 Wang C, Shen L, Zhao Z, *et al.* 1.2 MW peak power, all-solid-state picosecond laser with a microchip laser seed and a high gain single-passing bounce geometry amplifier[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 85: 14-18.
- 14 Teppitaksak A, Thomas G M, Damzen M J. Investigation of a versatile pulsed laser source based on a diode seed and ultra-high gain bounce geometry amplifiers[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12328-12336.