

## 激光与光电子学进展

## 2 kHz 重复频率分立路径 Nd:YAG Innoslab 激光放大器

陈忆兰<sup>1,2</sup>, 刘继桥<sup>2,3\*</sup>, 王明建<sup>3</sup>, 陈晓<sup>3</sup>, 朱小磊<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800

**摘要** 提出一种结构紧凑的分立路径 Nd:YAG Innoslab 激光新型八程放大器系统。种子光源为采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为增益介质的电光调 Q 激光振荡器, 输出平均功率 2.7 W 的种子光注入到 Innoslab 激光放大器中进行放大。当激光的输出重复频率为 2 kHz 时, 最高放大激光功率达到 13 W, 脉冲宽度约为 15.5 ns, 此时提取效率达到 14.6%。实验测得光束质量因子在  $x$  和  $y$  方向上分别小于 1.7 和 1.5。基于分立路径的激光放大器结构, 在最大泵浦功率下依然没有观察到寄生振荡及自发辐射放大现象。

**关键词** 激光器与激光光学; Innoslab 激光放大器; Nd:YAG; 分立路径

中图分类号 TN243

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223183

## Discrete Path Nd:YAG Innoslab Laser Amplifier Operating at 2 kHz Repetition Rate

Chen Yilan<sup>1,2</sup>, Liu Jiqiao<sup>2,3\*</sup>, Wang Mingjian<sup>3</sup>, Chen Xiao<sup>3</sup>, Zhu Xiaolei<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>Laboratory of Space Laser Engineering, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** A compact, discrete path Nd:YAG Innoslab laser amplifier system with novel eight-pass arrangement is developed. An electro-optic Q-switched oscillator using Nd:YVO<sub>4</sub> crystal as gain medium is used as the seed laser. With a seed laser power of 2.7 W at a repetition rate of 2 kHz, the amplified laser power of more than 13 W is achieved successfully with the pulse width of 15.5 ns, and the corresponding extraction efficiency is 14.6%. The experimentally measured laser beam quality factors are less than 1.7 and 1.5 in the  $x$  and  $y$  directions, respectively. Self-lasing and amplified spontaneous emission (ASE) are not observed at the maximum pump power with discrete-path laser amplifier configuration.

**Key words** laser and laser optics; Innoslab laser amplifier; Nd:YAG; discrete path

## 1 引言

激光二极管(LD)泵浦的高重复频率、大能量紧凑型全固态激光器, 在激光雷达、非线性频率变化、工业

加工等领域得到了广泛的关注与应用<sup>[1-3]</sup>。对于平均功率要求较高的激光器, 通常采用再生放大的方式对种子激光进行功率放大, 以实现高功率的脉冲激光输出<sup>[4-6]</sup>。

收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-02-27; 录用日期: 2023-03-19; 网络首发日期: 2023-03-30

基金项目: 星载高功率臭氧探测激光雷达研制项目(20Q61502F1)、上海市科学技术委员会集成电路科技支撑专项项目(20501120400)

通信作者: \*x\_qiao@siom.ac.cn

在固体激光放大器中,随着泵浦功率的提高,晶体内部的热效应在影响输出功率的同时也会造成光束质量的退化<sup>[7-8]</sup>。因此,为了保持紧凑和良好的光束质量,部分端面泵浦(Innoslab)激光放大器由于其具有高增益、高损伤阈值、高重叠效率,以及有效避免晶体的热致退偏振<sup>[9-11]</sup>等优势,在获得高功率激光脉冲输出的同时也能保证良好的光束质量。

2016年,毛叶飞等<sup>[12]</sup>搭建了一种八通Nd:YVO<sub>4</sub> Innoslab激光放大器,在10 kHz的重复频率下输出能量为8.4 mJ,能量提取效率约为29.8%。同年,Strotkamp等<sup>[13]</sup>采用两级Innoslab激光放大器结构,实现了100 Hz重复频率下500 mJ激光脉冲输出,脉冲宽度约为30 ns。2020年,Fayyaz等<sup>[14]</sup>采用混合腔型放大腔结构,实现了100 kHz重复频率下,平均功率为210 W的激光脉冲输出,脉冲宽度约为11.6 ns。

然而,传统的Innoslab放大腔通常仅采用两个反射镜组成,因此,多通穿过晶体的光束分布在同一个平面内,然而这一路径同样会被寄生振荡激光和放大自发辐射(ASE)所利用。因此,在放大器增益很高的情况下,通常会寄生振荡及观察到ASE<sup>[11]</sup>。本文实验对传统的Innoslab激光放大器进行了改进,将输出腔镜换为多片分立反射镜,从而使Innoslab激光放大器的多通放大路径分布在几个分立的平面内,有利于抑制寄生振荡及ASE的产生。

本文采用新型分立路径八程放大Innoslab激光放大器结构,在吸收泵浦功率为70.4 W的条件下,获得了13 W的输出功率,脉冲宽度约为15.5 ns,对应提取效率约为14.6%。实验测得光束质量因子在*x*和*y*方向上分别为1.7和1.5。得益于分立路径的Innoslab激光放大器结构设计,在最大泵浦功率下,未观察到ASE及寄生振荡现象。

## 2 实验装置

Nd:YAG Innoslab激光放大器系统的实验装置如图1所示。种子源激光器是采用Nd:YVO<sub>4</sub>晶体作为增益介质的电光调Q激光振荡器,在2 kHz的重复频率下,输出功率为2.7 W。*x*和*y*方向上的光束质量因子分别为1.15和1.19。

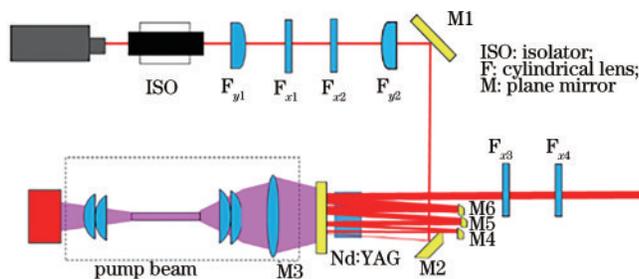


图1 Nd:YAG Innoslab激光放大器系统的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of Nd:YAG Innoslab laser amplifier system

Innoslab激光放大器系统的增益介质选用掺杂浓度为1%的Nd:YAG晶体,尺寸为12 mm(宽)×10 mm(长)×1 mm(高)。上下两个大面通水冷却,确保晶体的散热效率。通光面尺寸为12 mm×1 mm,镀有808 nm及1064 nm的高透膜。晶体的上下两个大面进行磨砂处理,以抑制寄生振荡。

Innoslab激光放大器的泵浦源采用由八个巴(bar)条组成的微通道水冷垂直叠阵,最大峰值功率为800 W,泵浦脉宽设为170 μs。在水冷温度为25 °C时,中心波长为808 nm,使Nd:YAG晶体对泵浦光的吸收达到最佳。每个bar条前均有一个柱透镜在快轴方向进行准直。泵浦光源输出光束经过柱透镜聚焦,耦合进入波导内部进行多次全反射,以便在慢轴上匀化。波导的出口通过后续光学系统成像到增益介质中。如图2所示,整形后的泵浦光尺寸为12 mm×1 mm,在*x*和*y*方向上分别呈现平顶分布和高斯分布。因此,激光晶体内部的热传导是准一维分布的,晶体的柱面热透镜可以有效避免增益晶体在高功率泵浦下由于热致双折射导致的退偏振。泵浦光整形系统引入了约20%的泵浦光损耗。

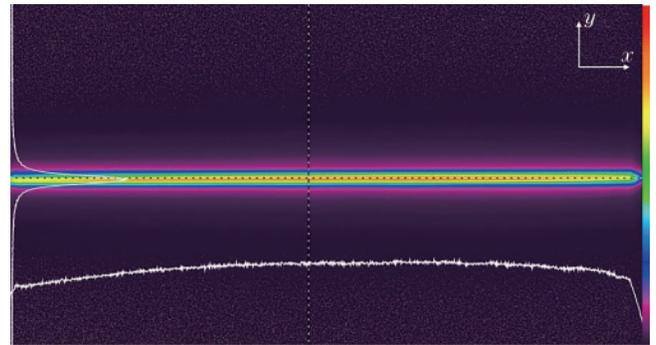


图2 Nd:YAG晶体处的泵浦光分布

Fig. 2 Beam profile of pump line in Nd:YAG crystal

在种子光源和Innoslab激光放大器之间插入了一个隔离器,以防止激光反向传输。种子光分别经过由四个柱透镜组成的种子光整形系统,包括水平柱透镜F<sub>x1</sub>(*f*=150 mm)、F<sub>x2</sub>(*f*=50 mm)和垂直柱透镜F<sub>y1</sub>(*f*=150 mm)、F<sub>y2</sub>(*f*=100 mm)。四个柱透镜均在1064 nm处镀增透膜。在水平方向上,激光利用高斯光束本身的发散特性使激光在功率提升的同时光束尺寸不断增大,从而避免高功率运转下增益晶体的损坏。根据高斯光束的传播特性,将半发散角定义为

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_x}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 是信号光的波长; $\omega_x$ 是水平方向种子光的束腰半径。每次往返的放大倍率 $M^{(1)}$ 定义为

$$M = \frac{W_x(N+1)}{W_x(N)} = \frac{W_x(N) + 2L_c \tan \theta}{W_x(N)}, \quad (2)$$

式中: $N$ 是往返次数; $L_c$ 是放大腔的长度; $W_x$ 是信号光的光斑半径。

在本文实验中,第一程放大晶体处水平方向的光斑半径约为 0.38 mm。八程放大后,水平方向的光束半径扩大到约 1.1 mm。在晶体处总的覆盖宽度约为 11.8 mm,因此几乎所有的泵浦区域均可以被有效利用。在垂直方向上,束腰半径  $\omega_{m,y}=0.13$  mm 位于 M2 的边缘,这一束腰大小与腔内的模式尺寸相匹配。由于晶体在快轴方向上存在热透镜效应,在垂直方向上类似一个稳定腔。放大器腔长约为 50 mm。由  $F_{x3}$  和  $F_{x4}$  组成的水平柱透镜用于将 Innoslab 放大后的椭圆形光斑整形回圆形光斑。

图 1 中 M1、M2、M3、M4、M5 和 M6 均为平面镜。M1 和 M2 镀有 45° 的 1064 nm 高反膜。M3 镀有 808 nm 高透膜及 1064 nm 高反膜。M4、M5 和 M6 镀有 1064 nm 高反膜,并在边缘处切 45° 楔角以避免硬边衍射。与传统的 Innoslab 激光放大器不同,本文实验中 Innoslab 激光放大器采用分立路径激光器结构。这种激光器结构具有两个优势:首先,一个反射镜的微小失调可以利用它相邻的反射镜得到纠正,这样可以在很大程度上减少放大器调节的精度要求;其次,它可以抑制 ASE 和寄生振荡<sup>[15]</sup>。如图 1 所示,信号光八次穿过 Nd:YAG 晶体后,从 M6 的边缘输出。

### 3 结果与讨论

理论上,激光脉冲的放大过程可以由下式<sup>[16]</sup>表示:

$$\frac{dE(x)}{dx} = E_s g_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E(x)}{E_s}\right) \right] - \alpha E(x), \quad (3)$$

式中: $E_s$ 是饱和能量密度; $\alpha$ 是每单位长度的损耗系数; $g_0$ 是小信号增益系数,可以通过下式<sup>[17]</sup>计算:

$$g_0 = \sigma t_p \frac{\eta_q \eta_s \eta_b P_{ab}}{h\nu V}, \quad (4)$$

式中: $\sigma$ 是受激发射截面; $t_p$ 是泵浦宽度; $\eta_q$ 是量子效率; $\eta_s$ 是斯托克斯因子; $\eta_b$ 是泵浦光与种子光之间的模式匹配效率; $P_{ab}$ 是吸收的泵浦功率; $h$ 是普朗克常数; $\nu$ 是信号光激光的频率; $V$ 是泵浦面积的体积。在种子功率为 2.7 W 时,计算得到输入能量密度约为 0.80 J/cm<sup>2</sup>,略大于  $E_s$  (0.67 J/cm<sup>2</sup>)。结果表明,放大器在饱和状态下工作可以有效提高能量提取效率<sup>[16]</sup>。实验中所用的参数如表 1 所示,对式(3)进行多次迭代求解,得到了本实验中 Innoslab 激光放大器参数下八通 Nd:YAG 放大

表 1 理论仿真所用参数

Table 1 Parameters in theoretical simulation

Parameter	Value
$\sigma$	$2.8 \times 10^{-19[18]}$ cm <sup>2</sup>
$\alpha$	0.04 cm <sup>-1</sup>
$\eta_q$	1 <sup>[19]</sup>
$\eta_s$	0.76 <sup>[19]</sup>
$\eta_b$	0.7
$V$	1.2 cm × 1 cm × 0.04 cm

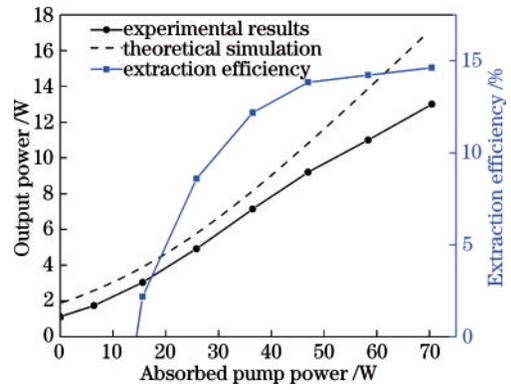


图 3 种子光功率为 2.7 W 时,放大光功率及提取效率与 Nd:YAG Innoslab 激光放大器吸收泵浦功率的关系

Fig. 3 Amplified output power and extraction efficiency versus absorbed pump power of Nd:YAG Innoslab laser amplifier with 2.7 W seed power

器输出功率的数值解,如图 3 所示。

在实验中,放大激光功率与吸收泵浦功率的关系如图 3 所示,当吸收泵浦功率为 70.4 W 时,放大光功率为 13 W,对应的提取效率为 14.6%。从图 3 中可以看出,在吸收泵浦功率低于 47 W 时,实验结果与理论模拟吻合较好。由于晶体内存在热效应,且理论计算过程中的增益是按照小信号增益来近似,因此实验结果略低于理论计算结果。在最大泵浦功率下,小信号增益系数与晶体长度的乘积  $g_0 l = 2.14 < 4$ ,预示着放大过程中没有 ASE 的产生,实验结果也证明了这一结论<sup>[20]</sup>。随着泵浦光功率继续增加,在放大光旁边可以观察到轻微的寄生振荡现象。

在本文的对比实验中,当仅采用两个腔镜 Innoslab 激光放大器结构,即将图 1 中的 M4、M5 和 M6 用一片反射镜替代时,在吸收泵浦功率为 70.4 W 的条件下,没有种子光注入,可测得大于 7 W 的自激振荡,自激振荡输出功率随吸收泵浦功率的变化如图 4 所示,图 4 中插图为自激振荡光斑强度分布。当采

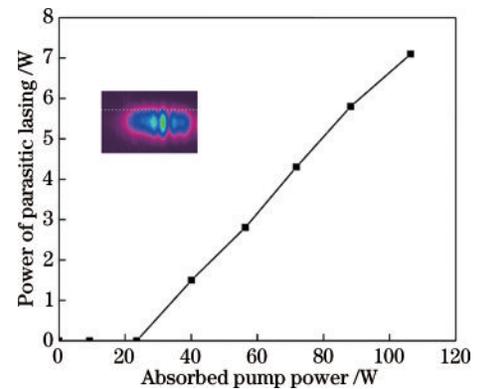


图 4 没有种子光注入时,自激振荡功率随吸收泵浦功率的变化关系,插图为自激振荡光斑强度分布

Fig. 4 Power of parasitic lasing versus absorbed pump power without seed laser injection (Inset: intensity distribution of parasitic lasing beam)

用分立路径光路结构时,在其他实验条件完全相同的情况下,没有观测到自激振荡输出。

在实验中,通过采样速率为 1 GHz 的光电探测器测得激光脉冲的时间波形,波形如图 5 所示。放大脉冲宽度约为 15.5 ns,大致与种子脉冲相同(15.2 ns)。由于种子光的输出模式是多纵模振荡模式,因此探测到的激光脉冲波形有轻微强度调制。当仅采用两个腔镜 Innoslab 激光放大器结构时,脉冲波形如图 6 所示,可以观察到由于出现自激振荡,在信号光脉冲之前有一段宽度约为 170  $\mu$ s 的脉冲基底。

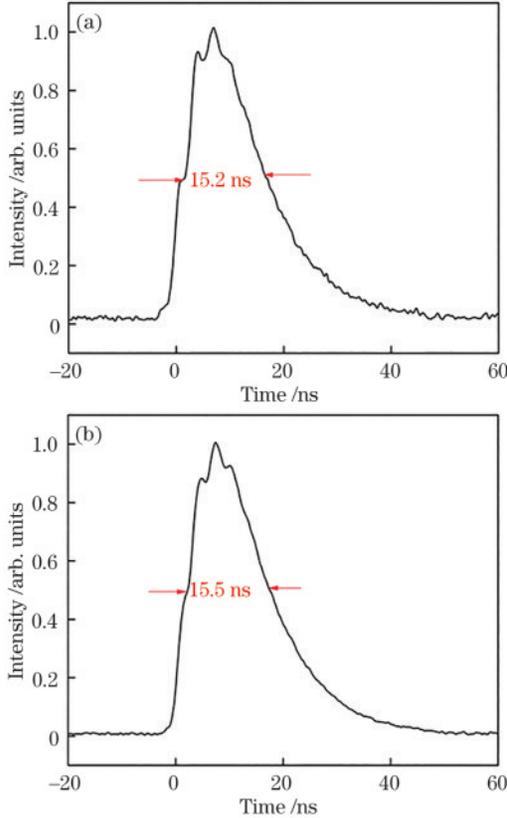


图 5 (a) 种子光和 (b) 放大脉冲的时间脉冲波形  
Fig. 5 Time pulse waveforms of (a) seed laser and (b) amplified pulse

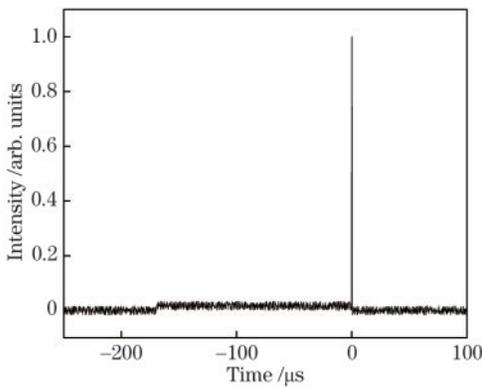


图 6 产生自激振荡时的单脉冲波形图  
Fig. 6 Waveform of single laser pulse with self-lasing

实验中采用 Spiricon M2-200s 激光束分析仪对放大后的光束质量因子( $M^2$ )进行测量,如图 7(b)所示。计算出  $x$  和  $y$  方向的  $M^2$  分别小于 1.7 和 1.5。由于信号光在水平方向上存在硬边衍射,且多通激光放大过程中热透镜效应不断叠加,与种子光相比[图 7(a)],光束质量有所恶化。图 7 中插图为 CCD 所探测到的光束远场强度分布情况。

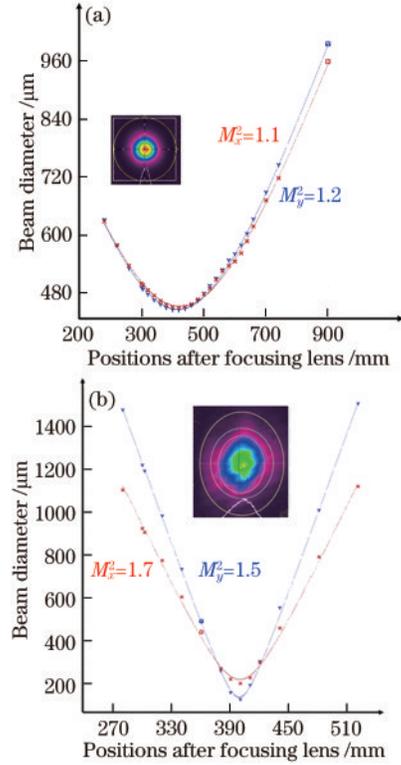


图 7 Nd:YAG Innoslab 激光放大器的光束质量对比。(a) 种子光的  $M^2$ ; (b) 13 W 放大功率时的  $M^2$ 。插图为远场光斑强度分布  
Fig. 7 Beam quality comparison of Nd:YAG Innoslab laser amplifier system. (a)  $M^2$  of seed laser; (b)  $M^2$  when amplified power is 13 W (Inset: intensity distribution of far-field beam)

### 4 结 论

设计并搭建了新型分立路径 Nd:YAG Innoslab 激光放大器系统。通过八程放大,在吸收泵浦功率为 70.4 W 时,在 2 kHz 重复频率下,种子光功率由 2.7 W 放大到 13 W,对应提取效率为 14.6%,脉冲宽度为 15.5 ns。通过分立路径激光器结构设计,可以看到明显的抑制寄生振荡的效果,并且在实验中未观察到 ASE。水平和垂直方向上的光束质量分别为 1.7 和 1.5。

在下一步的工作中,将通过优化种子激光器和放大器之间的模式匹配,进一步提高输出功率和提取效率。该 Innoslab 激光放大器将应用于非线性频率变

换,例如用作固体拉曼激光器或光参量振荡的脉冲激光泵浦光源。

### 参 考 文 献

- [1] Hwang D, Ryu S G, Misra N, et al. Nanoscale laser processing and diagnostics[J]. *Applied Physics A*, 2009, 96(2): 289-306.
- [2] Černý P, Jelinkova H, Zverev P G, et al. Solid state lasers with Raman frequency conversion[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, 28(2): 113-143.
- [3] Löhring J, Luttmann J, Kasemann R, et al. INNOSLAB-based single-frequency MOPA for airborne lidar detection of CO<sub>2</sub> and methane[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8959: 89590J.
- [4] Ostermeyer M, Kappe P, Menzel R, et al. Diode-pumped Nd: YAG master oscillator power amplifier with high pulse energy, excellent beam quality, and frequency-stabilized master oscillator as a basis for a next-generation lidar system[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(4): 582-590.
- [5] Ryabtsev G I, Bogdanovich M V, Grigor'ev A V, et al. Powerful all-solid-state multiwave laser for aerosol lidars[J]. *Journal of Optical Technology*, 2014, 81(10): 571-574.
- [6] Russbuedt P, Hoffmann D, Höfer M, et al. Innoslab amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 447-463.
- [7] Hodgson N, Weber H. Influence of spherical aberration of the active medium on the performance of Nd: YAG lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(9): 2497-2507.
- [8] Liu C, Riesbeck T, Wang X, et al. Influence of spherical aberrations on the performance of dynamically stable resonators[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(20): 5222-5228.
- [9] Guo J, Lin H, Li J F, et al. High power TEM<sub>00</sub> picosecond output based on a Nd:GdVO<sub>4</sub> discrete path Innoslab amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2875-2878.
- [10] Ma C, Liu Z, Liu K, et al. High efficiency, 41.6 W, 10 kHz picosecond output based on a Nd: YAG double-pass multi-folded Innoslab amplifier[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107767.
- [11] Ning J, Han K Z, He J L, et al. 83.4 W, 17.69 kHz spectral bandwidth, continuous-wave, beam densely folded Innoslab amplifier[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1109-1112.
- [12] Mao Y F, Zhang H L, Hao X L, et al. 8.4 mJ, 10 kHz, 3.6 ns, Nd: YVO<sub>4</sub> slab amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 11017-11022.
- [13] Löhring J, Strotkamp M, Elsen F, et al. Demonstration of a 500 mJ InnoSlab-amplifier for future lidar applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9726: 97260M.
- [14] Javed F, Zhang H, Gao Q, et al. A high average power, compact 100 kHz, 11.6-ns Nd: YAG Innoslab amplifier [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102926.
- [15] Gao Q, Javed F, Zhang H L. 212 W, Nd: YAG Innoslab nanosecond laser amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11170: 111701V.
- [16] Avizonis P V, Grotbeck R L. Experimental and theoretical ruby laser amplifier dynamics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(2): 687-693.
- [17] Koechner W. *Solid-state laser engineering*[M]. Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [18] Sato Y, Taira T. Temperature dependencies of stimulated emission cross section for Nd-doped solid-state laser materials [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(8): 1076-1087.
- [19] Sang S H, Zhang H L, Mao Y F, et al. Compact, high-average-power, nanosecond multi-pass Nd: YVO<sub>4</sub> Innoslab amplifier[J]. *Applied Physics B*, 2015, 121(2): 131-134.
- [20] Furuse H, Chosrowjan H, Kawanaka J, et al. ASE and parasitic lasing in thin disk laser with anti-ASE cap[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13118-13124.