

# 1 kHz 高倍率亚纳秒全固态激光放大器研究

杜鑫彪, 陈 檬\*, 任俊杰, 高小强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:** 高功率全固态亚纳秒激光器具有体积小、成本低、线宽窄、峰值功率高等优势, 在诸多领域具有重要的应用价值。为获得高功率亚纳秒激光输出, 首先通过被动调 Q 激光器得到亚纳秒种子激光, 然后利用 LD 侧泵模块, 采用双模块双通放大的实验设计, 在重复频率为 1 kHz 时, 获得了平均功率达 10 W, 脉冲宽度 816 ps, 线宽 39 pm, 光束质量  $M^2$  小于 1.8 的激光输出, 放大器整体放大倍率达 95 倍以上。

**关键词:** 放大器; 亚纳秒; 窄线宽; 侧面泵浦

**中图分类号:** TN248      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0305001

## Research on 1 kHz high-power sub-nanosecond all-solid-state laser amplifier

Du Xinbiao, Chen Meng\*, Ren Junjie, Gao Xiaoqiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** High-power all-solid-state sub-nanosecond lasers have the advantages of small size, low cost, narrow line width and high peak power. They have important application value in many fields. In order to obtain high-power sub-nanosecond laser output, a sub-nanosecond seed laser was first obtained through a passive Q-switched laser, and then an LD side pump module was used to design a dual-module dual-pass amplification experiment. At a repetition rate of 1 kHz, a laser output with an average power of 10 W, a pulse width of 816 ps, a line width of 39 pm, and a beam quality  $M^2$  of less than 1.8 was obtained. The overall magnification the amplifier was over 95 times.

**Key words:** amplifier; sub-nanosecond; narrow linewidth; side pump

## 0 引 言

全固态亚纳秒激光器输出脉冲具有光谱纯度高、易得大能量的特点, 在诸多领域具有重要的应用价值, 例如激光测距、激光雷达、激光加工、激光光谱学以及非线性光学等方面<sup>[1-5]</sup>。因此, 研究获取高平均功率、高单脉冲能量、窄脉冲宽度、窄输出线宽的亚纳秒激光具有十分重要的实际意义。

近年来, 针对高平均功率的 LD 连续泵浦下亚纳秒 MOPA 激光放大器已有诸多研究。例如 Agnesi 等<sup>[6]</sup>采用半导体激光抽运的主振荡功率放大系统, 使用能量 62  $\mu\text{J}$ 、频率 10 kHz、脉宽 473 ps 的光束作为种子激光, 经过 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条双通放大后, 获得了能量 545  $\mu\text{J}$ 、脉宽 577 ps 的激光输出, 整体放大倍率为 8.8; 颜凡江等<sup>[7]</sup>, 报道了一种采用被动调 Q 微片激光器作

收稿日期: 2019-11-02; 修订日期: 2019-12-26

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金 (U1631240)

作者简介: 杜鑫彪 (1993-), 男, 硕士生, 主要从事全固态亚纳秒激光放大及倍频方面的研究。Email: duxinbiaodu@163.com

通讯作者: 陈檬 (1963-), 女, 研究员, 博士, 主要从事全固态亚纳秒、皮秒、倍频激光器件等方面的研究。Email: chenmeng@bjut.edu.cn

为主振荡器,单端面泵浦块状晶体作为一级放大实现高增益的实验方案,将单脉冲能量 100  $\mu\text{J}$ , 脉冲宽度 620 ps 的种子光经双通放大获得了重复频率 10 kHz, 最大输出功率 11.46 W, 脉宽 600 ps 的激光输出, 整体放大倍率约为 11.5。此外, 针对获得高单脉冲能量的低占空比 LD 脉冲泵浦窄脉宽 MOPA 激光放大器的研究亦有较多报道。例如 Yukio 等<sup>[8]</sup>使用脉冲半导体激光端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 调 Q 后获得了单脉冲能量 0.76 mJ, 脉宽 700 ps 的种子激光, 经氙灯泵浦 Nd:YAG 晶体单通放大, 获得重复频率 20 Hz、单脉冲能量 12 mJ、脉宽 700 ps 的亚纳秒激光输出, 整体放大倍率为 15.8 左右; Wand 等<sup>[9]</sup>使用能量 3 mJ、重频 10 Hz、脉宽 6.4 ns 的光束作为种子激光, 经过端面泵浦掺杂浓度为 3 at.% 的 Yb:YAG 晶体棒四通放大后, 获得重复频率 10 Hz、脉冲宽度 6.4 ns、能量 220 mJ 的激光输出, 该放大系统放大倍率约为 73。从上述报道来看, 无论高重复频率下的 LD 连续泵浦, 还是低重频的 LD 脉冲泵浦, 采用板条多通放大技术方案是实现亚纳秒小信号种子光放大的较好方案, 但其技术难度较大成本较高。LD 侧泵模块是市场上易采购的成熟产品, 增益倍率调节更加方便, 易实现小型化且成本相对较低, 所以在工程应用中更加广泛。然而基于高占空比的准连续 LD 侧泵模块亚纳秒 MOPA 放大系统的报道较少, 有待进一步研究探索。

该研究通过 20% 高占空比 LD 脉冲端面泵浦 Nd:Cr:YAG 键合晶体, 利用被动调 Q 微片激光器作为主振荡器, 同样 20% 高占空比 LD 脉冲侧面泵浦 Nd:YAG 模块, 采用双模块双通放大的实验方案将重复频率 1 kHz、脉冲宽度约 810 ps、线宽 34 pm、单脉冲能量为百微焦的亚纳秒种子激光, 放大得到平均功率约 10 W、线宽 39 pm、脉宽 816 ps、光束质量因子  $M^2$  小于 1.8 的亚纳秒激光脉冲输出, 总体放大倍率达 95 倍以上, 整个实验系统结构简单且紧凑, 容易实现产品小型化且具有高效的放大特性。

## 1 实验装置

### 1.1 亚纳秒激光种子源

LD 抽运的 Nd : YAG/Cr<sup>4+</sup> : YAG 被动调 Q 微型激光主振荡器, 输出重复频率 1 kHz, 单脉冲能量 106  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度 810 ps、线宽 34 pm、光束质量因子为 1.5 的

亚纳秒激光, 其光路如图 1 所示。泵浦源为带尾纤的半导体激光器, 其中心波长 808 nm, 光纤的芯径 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径 NA 为 0.22, 泵浦光耦合系统的耦合比为 2 : 1 并在其间加入二分之一波片用来调整泵浦光的偏振方向, 以达到与被动调 Q 晶体偏振匹配的目的。实验中所采用的 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 是键合晶体, 其初始透过率为 40%, 长度约为 8 mm。前端面 (S1) 镀 1 064 nm 高反 808 nm 高透, 后端面 (S2) 面镀对 1 064 nm 部分透过, 透过率约为 50%。键合晶体中 Nd : YAG 部分掺杂浓度为 1.1%。整个晶体用铜包裹, 放入通有 20  $^{\circ}\text{C}$  冷却水的热沉中。

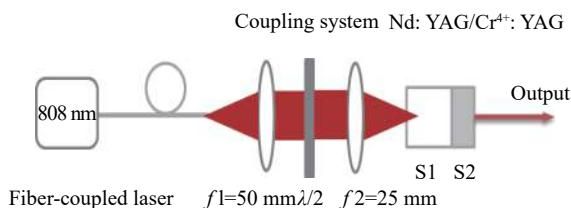


图 1 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 键合晶体的被动调 Q 实验光路图  
Fig.1 Optical path diagram of passive Q-switch experiment of Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG bonded crystal

### 1.2 双模块双通放大实验设计

放大实验装置如图 2 所示, 薄膜偏振片 (TFP1)、法拉第光学旋转器和二分之一波片构成光学隔离系统。两个侧面泵浦模块中的增益介质均采用尺寸为  $\varphi 3 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$  的棒状 Nd:YAG 晶体, 掺杂浓度为 0.6%, 侧泵模块中通有 20  $^{\circ}\text{C}$  冷却水循环。M1 为种子光斑与放大增益晶体内光斑的准直匹配镜。90 $^{\circ}$ Rotator 为石英晶体, 用于补偿两晶体棒的热退偏

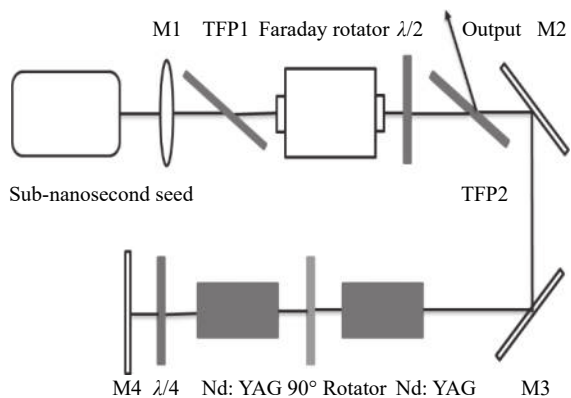


图 2 双模块双通放大实验光路图  
Fig.2 Optical path diagram of double-module double-pass amplification experiment

效应。四分之一波片用于旋转激光偏振状态, M2、M3 为 1 064 nm 45°反射镜, M4 为 1 064 nm 全反镜。

主振荡器激光经过 M1 透镜准直后, 通过隔离系统, 依次进入放大模块并被全反镜 M4 反射, 再经四分之一波片改变偏振状态, 使反射激光的偏振方向相对于入射光旋转 90°, 因此再次经过 TFP2 偏振片时被反射输出。由石英晶体对两模块的热退偏进行补偿, 以减少输出损耗。双模块双通放大的优势在于充分利用增益介质的储能; 更好的补偿高功率泵浦下的热致双折射效应, 提高放大光的光束质量。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 主振荡器

兼顾脉宽、线宽和输出功率, 主振荡器选用了 40% 中等初始透过率的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 和短于 10 mm 的腔长, 在 1 kHz、峰值功率 30 W、占空比 20% 的脉冲泵浦下, 经光纤耦合半导体激光器泵浦的 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 键合晶体, 得到输出功率 106 mW、脉宽 810 ps、线宽 34 pm 的种子激光脉冲输出。图 3 为采用响应时间 25 ps、带宽 15 GHz 的 ET-3500 InGaAs 快速光电探测器和 1 GHz-Tektronix 的数字示波器, 测量得到的脉冲波形及脉冲宽度。为确定种子激光的稳定性, 实验还采用示波器余晖累积方法, 测量了输出脉冲波形的稳定度, 得到如图 4 所示的余晖累积图, 经计算时间抖动性小于 ±2.9%, 幅值不稳定性为 ±2.7%。

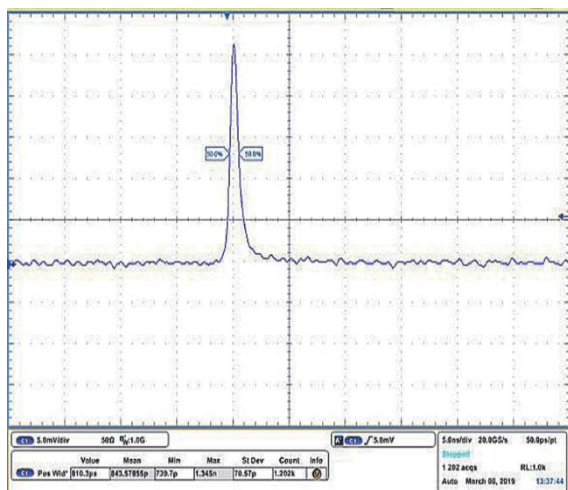


图 3 主振荡激光脉冲波形图

Fig.3 Waveform of the main oscillating laser pulse

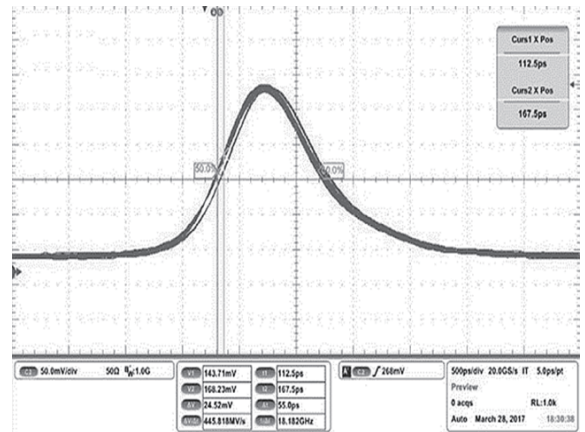


图 4 示波器余晖累积图

Fig.4 Oscilloscope accumulative chart

从图 3、4 可以看出种子激光幅值稳定性和时间抖动性较好且输出脉冲波形无前后尾脉冲, 为后续高效率稳定放大提供了可靠种子激光。随后, 利用 Solar Laser Systems 波长计测量得到输出线宽为 34 pm, 其测量精度为 ±3 pm, 测量结果如图 5 所示。采用 Spiricon M<sup>2</sup>-200S 光束质量分析仪对种子光光束质量进行测量, 经测量得到 M<sup>2</sup>=1.5。

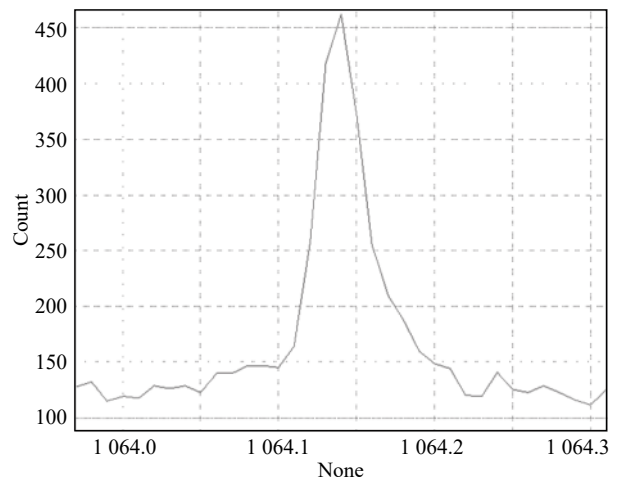


图 5 主振荡激光线宽

Fig.5 Main oscillation laser line width

### 2.2 放大器设计

对于激光功率放大器, 可以利用迭代方法来模拟激光的放大过程<sup>[10-11]</sup>, 其单程放大后输出能量可表示为:

$$E_1 = E_S \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_0}{E_S} \right) - 1 \right] \exp (g_0 l) \right\} \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为放大器的输入能量密度;  $E_S$  为饱和能量密



度;  $E_1$  为输出能量密度;  $g_0$  为小信号增益系数;  $l$  为增益介质长度。其中  $g_0$  是由泵浦条件, 增益介质等诸多因素所确定的, 根据固体激光工程可得:

$$g_0 l = K E_P \quad (2)$$

$$K = \eta_T \eta_a \eta_S \eta_Q \eta_B \eta_{ST} \eta_{ASE} / A E_S \quad (3)$$

$$g_0 = \eta_T \eta_a \eta_S \eta_Q \eta_B \eta_{ST} \eta_{ASE} E_P / A E_S l \quad (4)$$

式中:  $\eta_T$  表示泵浦耦合效率;  $\eta_a$  表示增益介质的吸收效率;  $\eta_S$  表示 Stokes 效率;  $\eta_Q$  表示量子效率;  $\eta_B$  表示光斑与激光棒横截面之比;  $\eta_{ST}$  表示上能级储存效率;  $\eta_{ASE}$  表示放大自发辐射损耗;  $E_P$  表示泵浦能量密度;  $E_S$  表示饱和能量密度;  $A$  为光束在增益介质中的有效横截面积。从公式 (4) 中可以看出小信号增益系数  $g_0$  与诸多能量转换过程密切相关, 且这些能量转换过程都是影响小信号增益的重要因素, 且在实际过程中, 上面这些参数彼此相关又复杂, 很难进行清晰的测量。因此, 可在单通放大的实验中推导得出  $g_0$ , 进而在双通放大实验中验证输出结果。实验获得双模块单通输出 1.5 W 代入公式 (1) 中可推导得出  $g_0 l = 2.44$ 。

双程放大器的输出能量密度表达式:

$$E_2 = E_S \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_1}{E_S} \right) - 1 \right] \exp (g_0' l) \right\} \quad (5)$$

$$g_0' = (1 - \eta_i) g_0 \quad (6)$$

$$\eta_i = (E_1 - E_0) / g_0 l E_S \quad (7)$$

联立以上公式 (5)~(7), 当入射光平均功率为 106 mW, 计算得到双模块双通放大的理论输出功率为 13.8 W。

### 2.3 双模块双通放大

在获得亚纳秒种子激光输出后, 将其导入双模块进行双通放大, 实验中将所用侧泵模块的电源与种子光的泵浦驱动电源做了同步驱动控制。在模块泵浦脉宽 200  $\mu$ s, 电流 80 A 时, 经两个特性相同的 Nd:YAG 侧泵模块双通放大, 通过调整光路最后获得了功率 10.1 W、单脉冲能量 10.1 mJ、脉宽 816 ps 的亚纳秒激光输出, 图 6 为放大输出的脉冲波形。

采用 Spiricon  $M^2$ -200S 光束质量分析仪测量了双通放大后的光束质量, 获得  $M^2=1.8$  的测量结果, 光斑分布如图 7 所示。利用 Solar Laser Systems 的波长计测量其输出线宽 39 pm, 所得结果如图 8 所示。所得输出功率随泵浦电流变化曲线如图 9 所示。

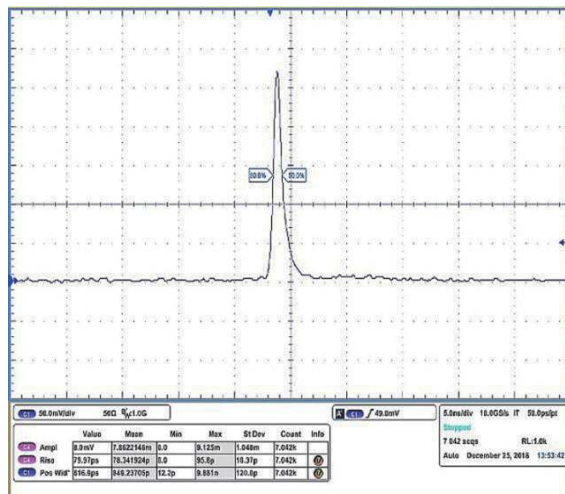


图 6 双模块双通放大脉冲波形

Fig.6 Double-module double-pass amplified pulse waveform

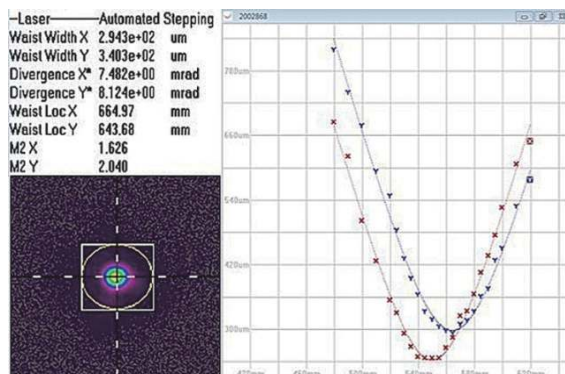


图 7 输出激光光束质量

Fig.7 Beam quality of output laser

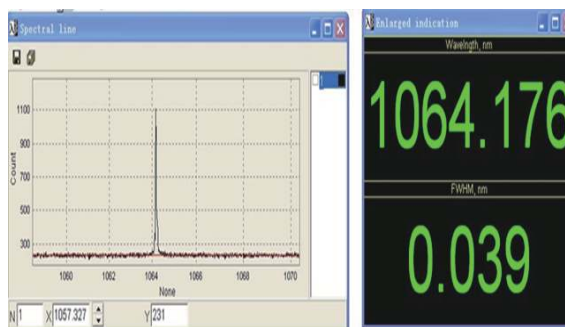


图 8 输出激光线宽

Fig.8 Line width of output laser

从实验结果来看, 实验所得输出功率为 10.1 W 比理论计算值 13.8 W 要小; 输出脉冲宽度和线宽与种子光相比, 没有明显的变化; 输出光束质量略有变差。分析放大输出功率低于理论设计值的原因在于, 退偏补偿不能 100% 补偿, 退偏光未经 TFP2 反射输

出而是经光隔离器后从 TFP1 反射输出,进而降低了双通放大从 TFP2 处的输出功率。

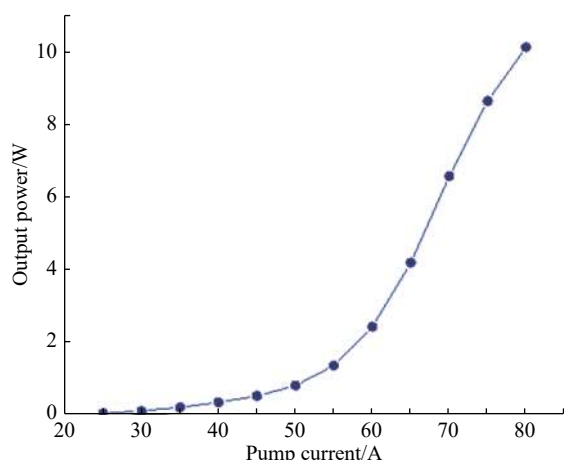


图 9 输出功率随泵浦电流变化关系图

Fig.9 Relationship between output power and pump current

### 3 结 论

报道了一种结构简单紧凑的亚纳秒激光放大器,且兼具放大效率高,输出功率高,脉冲宽度窄,线宽窄等特点。该放大器采用双模块双通放大的实验设计,通过侧面泵浦两根性质均一的 Nd:YAG 棒状晶体,实现了重复频率 1 kHz,输出脉宽 816 ps,平均功率 10.1 W,线宽 39 pm 的激光输出。该放大方案较好的提升了放大效率,使之整体放大倍率到达 95 倍左右,且输出光束质量较种子光没有较大差异,是一种具有应用潜力的放大器设计方案。

#### 参考文献:

[1] Duan Jialin, Li Xudong, Wu Wentao, et al. Research on LD pumped 1.06  $\mu\text{m}$  burst-mode laser and the amplification systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0105003. (in Chinese)  
段加林, 李旭东, 武文涛, 等. LD 泵浦 Nd:YAG 1.06  $\mu\text{m}$  脉冲串激光及放大研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0105003.

[2] Liu Qiuwu, Chen Yafeng, Wang Jie, et al. Effects of wavelength shift and energy fluctuation on inversion of  $\text{NO}_2$  differential absorption lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018,

26(2): 253–260. (in Chinese)

刘秋武, 陈亚峰, 王杰, 等. 差分吸收  $\text{NO}_2$  激光雷达波长漂移和能量波动对浓度反演的影响[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 253–260.

[3] Zhao Zhilong, Wu Jin, Wang Haitao, et al. Experimental demonstration of differential synthetic aperture lidar imaging at very low return level [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 276–283. (in Chinese)  
赵志龙, 吴谨, 王海涛, 等. 微弱回波条件下差分合成孔径激光雷达成像实验演示[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 276–283.

[4] Liu Guojun, Bo Baoxue, Qu Yi, et al. High power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 4–6. (in Chinese)  
刘国军, 薄报学, 曲轶, 等. 高功率半导体激光器技术发展与研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 4–6.

[5] Cerny P, Jelinkova H, Zverev P G, et al. Solid state lasers with Raman frequency conversion [J]. *Prog in Quant Electr*, 2004, 28(2): 113–143.

[6] Agnesi A, Dallochio P, Pirzio F, et al. Sub-nanosecond single-frequency 10-KHz diode-pumped MOPA laser [J]. *Applied Physics B*, 2010, 98: 727–741.

[7] Yan Fanjiang, Yang Ce, Chen Meng, et al. High repetition, high peak power and narrow line-width laser amplifie [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0206002. (in Chinese)  
颜凡江, 杨策, 陈檬, 等. 高重频高峰值功率窄线宽激光放大器[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 0206002.

[8] Yukio Kyusho, Motohiro Arai, Katsuji Mukaihara, et al. High-energy subnanosecond compact laser system with diode-pumped, Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Advanced Solid-State Laser*, 1996, 1: 382–385.

[9] Wandt C, Klingebiel S, Siebold M, et al. Generation of 220 mJ nanosecond pulses at a 10 Hz repetition rate with excellent beam quality in a diode-pumped Yb: YAG MOPA system [J]. *Opt Lett*, 2008, 33: 1111–1113.

[10] Koechner W. Solid State Laser Engineering[M]. Sun W, Jiang H W, Cheng G X, transl. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)  
克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002.

[11] Lee M Franz, John S Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. *Applied Physics*, 1963, 2349: 8.