

100 W 高功率 Nd:YAG 皮秒板条激光放大器

董彬*, 刘磊, 唐晓军, 刘洋

华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 设计了一种高功率的固体皮秒脉冲激光放大器。采用增益介质为 Nd:YAG 材料的传导冷却端面泵浦板条放大器结构设计,通过板条结构多角度放大,实现对皮秒脉冲激光的四程放大。分析板条端面切角与激光入射角度的选取对填充因子以及激光功率放大的影响。最终实现了在种子光重复频率为 100 kHz、激光脉冲宽度为 9.6 ps 的工作条件下,系统输出激光功率为 103 W,单脉冲能量为 1.03 mJ。

关键词 激光器; 皮秒激光; 固体激光器; 大平均功率; 四程放大

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101004

100-W High-Power Nd:YAG Picosecond Laser-Slab Amplifier

Dong Bin*, Liu Lei, Tang Xiaojun, Liu Yang

Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract In this study, we design a high-power compact solid-state picosecond pulse laser amplifier. We design a conducting-cooled end-pumped slab laser amplifier for which the gain medium is Nd:YAG. We achieve the four-pass amplification of the picosecond pulsed laser through the slab multi-angle magnification technology. The influences of the selection of cutting angles of slab end face and laser incident angles on the filling factor and laser power amplification are analyzed. The output power of a mode-locked laser with 9.6-ps pulse duration and 100-kHz repetition rate respectively, is amplified up to 103 W; the single-pulse energy is 1.03 mJ.

Key words laser; picosecond laser; solid-state laser; high average power; four-pass amplification

OCIS codes 140.7090; 140.3580; 140.3280

1 引 言

近些年来,超短脉冲激光的快速发展为激光加工领域带来了巨大的改变。实验表明,当激光脉冲宽度低于 10 ps 时^[1],激光加工过程中的热传导效应明显减弱,而在激光“冷加工”过程中,激光加工精度明显提高。在未来的激光加工中,具有高精度、“冷加工”特点的超快激光将逐渐占据重要地位。如何实现高平均功率、高峰值功率的皮秒脉冲激光输出是目前皮秒脉冲激光器研究领域的热点。

目前,实现皮秒脉冲激光输出的技术手段主要是采用可饱和吸收体(SESAMs)被动锁模方式^[2]。但可饱和吸收体损伤阈值较低,限制了被动锁模皮秒脉冲激光的输出功率。目前,为实现高平均功率、高峰值功率的皮秒脉冲激光输出,常采用主振荡功

率放大(MOPA)结构来对低功率脉冲激光种子光进行功率放大。

2013 年,日本的 Yoshino 等^[3]将 Nd:YVO₄ 作为增益介质,采用掠入射的方法对重复频率为 100 MHz、脉冲宽度为 7 ps 的皮秒脉冲种子光进行多程放大,通过两个放大模块级联的方法,得到平均功率为 65 W 的激光输出;2018 年,华北光电技术研究所的李天琦等^[4]利用光子晶体光纤棒放大得到了平均功率为 101.7 W、重复频率为 30 MHz、脉冲宽度为 6.4 ps 的近衍射极限输出;上海理工大学的赵明等^[5]以光纤振荡器作为种子源,采用光纤放大器与 Nd:YVO₄ 固体放大器级联的方式,实现了皮秒脉冲激光放大,系统重复频率可调,分别在 1, 10, 100 kHz 时,得到 2.34, 4.30, 10.30 W 的平均功率输出,单脉冲能量分别可以达到 2.34, 0.43, 0.10 mJ;

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-07-11

* E-mail: 13269337283@163.com

2018年,浙江大学的汪勇等^[6]利用端面泵浦的Nd:YVO₄与侧面泵浦的Nd:YAG放大级结合的两级固体双通放大装置,对重复频率为50 kHz、脉宽为3.9 ps的种子光进行功率放大,得到了平均功率为27.65 W的激光输出。同年,汪勇课题组^[7]对实验内容进行了改进,实验中增加了另一级端面泵浦Nd:YVO₄放大级,最终实现了平均功率为31.8 W、重复频率为30 kHz、脉冲宽度为4.8 ps的激光输出,脉冲激光峰值功率超过100 MW。

本文将传导冷却端面泵浦板条激光放大器(CCEPS)多角度放大技术与激光偏振复用技术相结合,以Nd:YAG作为增益介质对被动锁模激光器

输出的脉冲宽度为9.6 ps的低功率激光进行四程放大。当种子光重复频率为100 kHz时,最终可得到103 W的功率输出,对应的单脉冲能量达到1.03 mJ。

2 基本原理

2.1 传导冷却端面泵浦板条放大器“之”字形光路放大过程

CCEPS结构内,激光在板条结构增益介质内部以“之”字形传播,有效地补偿了板条增益介质内温度不均匀造成的热畸变。板条增益介质结构如图1所示。

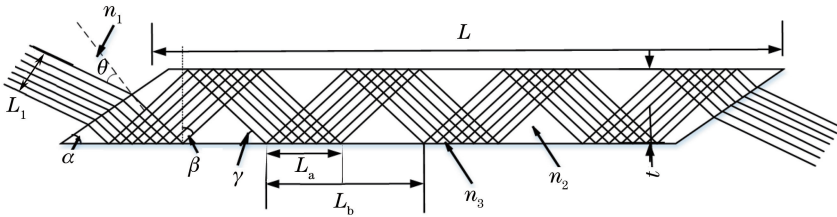


图1 光束在板条内部的“之”字光路

Fig. 1 Optical path of laser beam in zig-zag laser slab

图中: L 为板条介质的长度; t 为板条厚度; α 为板条晶体端面切角; θ 为激光入射角; β 为激光在板条介质侧面的反射角; γ 为激光与板条侧面夹角; L_1 为入射激光光束尺寸; L_b 、 L_a 分别为激光光束在板条内反射一个周期的长度与交叠部分的长度; n_1 为空气折射率; n_2 为增益介质折射率; n_3 为板条侧面所镀全反膜折射率。

激光在板条内部以“之”字形传播时,增益介质内部仅有部分体积被入射的种子光填充,因此激光在板条内部的填充情况决定了板条增益介质的利用率,激光填充率高,能量利用效率也随之提高。定义填充因子 f 来反映板条内的填充情况:

$$f = \frac{L_a}{L_b} = \frac{L_1}{2t \cdot \cos \theta} \cdot \frac{1}{\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin \theta}{n_2} \right) \right]} \quad (1)$$

填充因子的大小与板条厚度 t 、端面切角 α 、入射激光尺寸 L_1 和入射角 θ 有关。在CCEPS激光放大结构中需要保证激光在板条内以全反射形式传播,同时,激光光束尺寸不超过板条端面尺寸。板条尺寸的设计需要满足以上两个条件。

当激光尺寸等于板条端面尺寸时,通过MATLAB仿真研究激光入射角 θ 与板条切割角 α

对填充因子 f 的影响,结果如图2所示。

图2(a)所示为在晶体端面切角一定的条件下,填充因子与激光入射角 θ 的关系曲线。图2(b)所示为在激光入射角一定的条件下,填充因子与端面切角 α 的关系曲线。激光在板条增益介质中的填充因子 f 随激光入射角 θ 以及板条端面切角 α 的增大而减小,为获得更高的填充因子,理论上应选用较小的激光入射角与板条端面切角。实验所用板条晶体尺寸为67 mm×11 mm×1.7 mm,晶体端面切角设计为45°,由此确定激光入射角选取范围为14.3°~45°。由板条晶体尺寸得到激光以17.7°、21.5°、25.7°、29.8°等特定分立的角度入射进板条后,激光在板条内部恰好传输整数个周期,激光从晶体输出端输出后不会产生光束分裂。综合考虑后选用22°与26°两个特定角度作为激光入射角,在这两个角度入射情况下,激光从板条端面输出时不会产生尖角漏光现象,激光光束在板条内部可实现完整的传输。相对应的激光填充因子 $f_{22^\circ} = 0.826$, $f_{26^\circ} = 0.801$ 。

结合“之”字光路板条激光放大器特点推导Frantz-Nodvik公式^[8-10],可得到种子光在高重复频率工作条件下以“之”字形在板条结构增益晶体内部传输过程中,输出激光功率密度与输入激光功率密度之间的关系式为

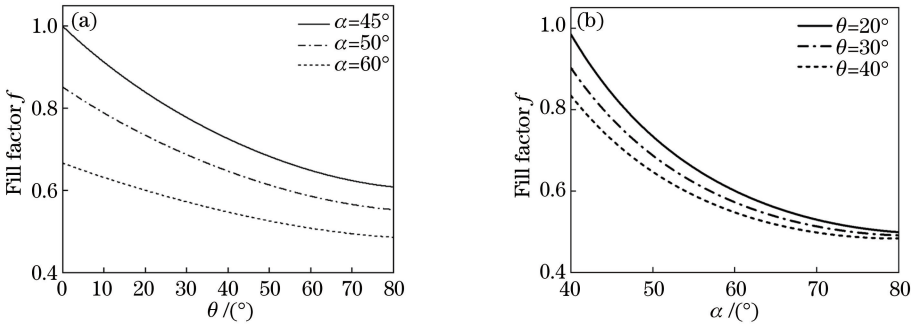


图 2 填充因子与不同影响因素的关系曲线。(a)激光入射角 θ ; (b)板条端面切角 α
Fig. 2 Fill factor f as a function of different influence factors. (a) Incident angle θ of laser;
(b) cutting angle α of slat end face

$$I_{out} + I_s \ln(I_{out}) = \left[\frac{P_{in}}{A \cdot f(2-f)} \right] + I_s \ln \left[\exp \left(\frac{P_{pump} \cdot \eta_{sys}}{A \cdot I_s \cdot \cos \gamma} \right) \cdot \frac{P_{in}}{A \cdot f(2-f)} \right], \quad (2)$$

式中: I_{out} 为激光器输出功率密度; I_s 为晶体饱和功率密度, 对于 Nd:YAG 晶体, $I_s = h\nu/(\sigma\tau)$, 其中 h 为普朗克常数, ν 为激光频率, σ 为 Nd:YAG 晶体受激发射截面面积, τ 为荧光寿命, 在激光波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 时, 饱和功率密度 $I_s = 2.89 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$; A 为增益晶体端面尺寸; P_{in} 为输入种子光功率; P_{pump} 为泵浦功率; η_{sys} 为系统总效率, 表示为 $\eta_{sys} = \eta_T \eta_a \eta_s \eta_Q \eta_B \eta_{ST} \eta_{ASE}$, η_T 为泵浦光耦合效率, η_a 为晶体吸收效率, η_s 为斯托克斯效率, η_Q 为量子效率, η_B 为交叠效率, η_{ST} 为晶体能量存储效率, η_{ASE} 为自发发射(ASE)损耗效率。小信号增益系数可表示为 $g_0 = \frac{P_{pump} \eta_{sys}}{I_s V}$, 其中 V 为板条晶体体积; γ 为激光与板条侧面的夹角。

从(2)式看出, 采用 CCEPS 结构放大器进行激光功率放大时, 放大后的激光输出功率同样受到板条内填充因子大小以及激光在板条内传输具体角度的影响。计算种子光以特定入射角入射时, 经过板条增益介质放大后输出的激光功率, 结果如图 3 所示, 从图中可以看出, 随着激光入射角的增大, 放大器对种子光的放大能力下降。

定义激光放大器提取效率为输入的激光脉冲从增益介质中提取的能量与激光上能级储存的总能量之比, 可以表示为

$$\eta = \frac{P_{out} - P_{in}}{g_0 L I_s}, \quad (3)$$

式中: η 为激光放大器提取效率; P_{out} 为放大级激光输出功率。

在激光多程放大过程中, 前一程放大输出功率

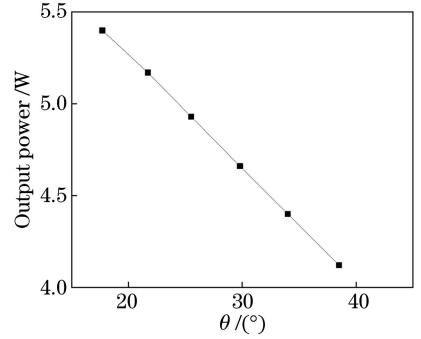


图 3 激光输出功率与种子入射角的关系曲线
Fig. 3 Output power of laser as a function of incident angle of seed laser

P_{k-1} 即为下一程输入功率, 增益介质内的反转粒子数由于前一程激光提取能量后造成了部分增益损耗, 能量提取效率为 η_{k-1} , 其余部分不变, 因此第 k 程输出激光光强为

$$I_{out} + I_s \ln(I_{out}) = \frac{P_{k-1}}{A \cdot f(2-f)} + I_s \ln \left\{ \exp \left[\frac{P_{st} \cdot (1 - \eta_{k-1})}{A \cdot I_s \cdot \cos \gamma} \right] \cdot \frac{P_{k-1}}{A \cdot f(2-f)} \right\}, \quad (4)$$

式中 P_{st} 为介质储存的泵浦功率。

2.2 实验装置

实验装置如图 4 所示。采用被动锁模 Nd:YVO₄ 晶体激光器作为种子源, 在 100 kHz 重复频率时, 输出平均功率为 4 W、激光脉冲宽度为 9.6 ps 的线偏振光。种子光经过由半波片($\lambda/2$ plate)、偏振分光镜(PBS)、法拉第旋光器(FR)组成的光隔离器(isolator), 偏振态保持为水平偏振, 可以防止回光对种子源造成损伤。种子光经过光束整形装置后光斑沿竖直方向被拉长, 与增益板条端面尺寸匹配。水平偏振的种子光几乎全部透射通过薄膜偏振片(TFP), 经过平面镜 M2 后进入板条结构的增益晶

体。增益介质为掺杂原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体,晶体尺寸为 1.7 mm×11 mm×67 mm,两端面切角为 45°,两端镀有 1064 nm 增透膜以及 885 nm 高反膜。实验中采用单端 LD(laser diode)端面泵浦方式,泵浦光通过光耦合系统入射至板条端面,经反射后进入板条内部。板条的两大面焊接有微通道结构金属热沉,通过水冷机精确控温,设置温度为 25 °C。种子光与增益介质端面法线方向呈 26°入射,在板条晶体内部以“之”字形传输。种子光

从晶体另一端输出后,经过平面反射镜 M3、M4、M5 后改变传输方向,以 22°入射角重新入射进入增益板条进行第二次放大。为减小光束发散带来的影响,板条晶体后加入 4F 成像系统。偏振态为水平偏振的线偏振种子光经过 M6 与四分之一波片后变为圆偏振光,经过 0°全反镜反射后第二次经过四分之一波片,种子光偏振态变为垂直偏振。按照原光路经过增益晶体的第三、第四次放大后垂直偏振的种子光由薄膜偏振片反射输出。

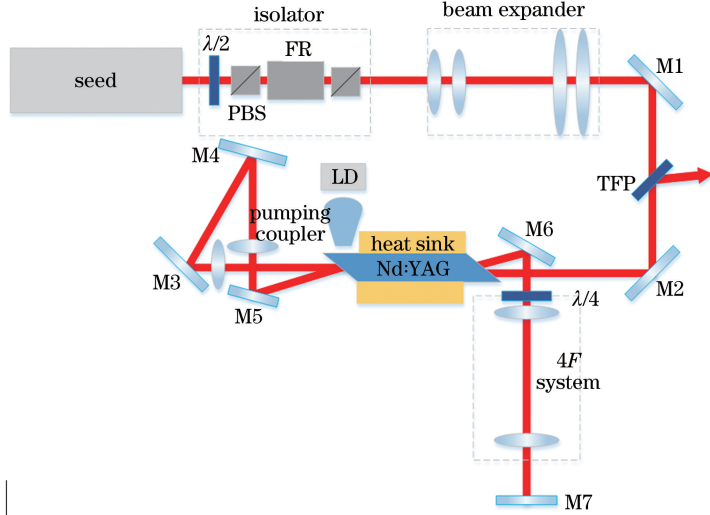


图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic of experimental setup

3 实验内容与结果分析

实验中采用 885 nm 半导体泵浦阵列作为泵浦源,使用直接上能级泵浦方式进行泵浦,提高了斯托克斯效率。对泵浦光发射光谱以及经过增益介质后的透射光谱进行测量,结果如图 5 所示。泵浦光经过增益介质后在中心波长 885 nm 附近有两个吸收峰。

由于种子光在 100 kHz 高重复频率下工作,泵浦阵列采用连续泵浦工作方式。通过实验对所用

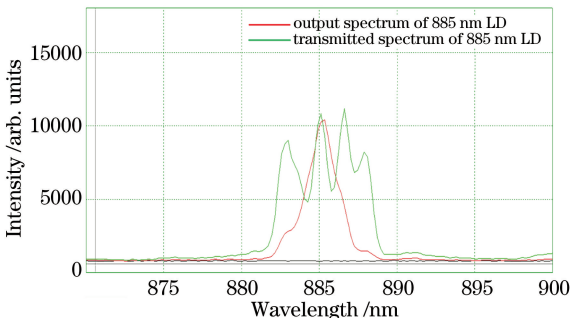


图 5 885 nm 泵浦 LD 激光光谱

Fig. 5 Lasing spectra of 885-nm pump LD

885 nm 泵浦 LD 阵列输入输出特性进行分析,泵浦 LD 阵列输出功率与注入电流之间的关系如图 6 所示,可知所用泵浦 LD 阵列工作阈值电流为 10 A。当半导体泵浦阵列的注入电流为 80 A 时,泵浦光功率可达到 1300 W 以上。

将作为种子源的皮秒脉冲激光器的重复频率设置为 100 kHz,实际测得输出激光脉冲宽度为 9.6 ps,如图 7 所示。

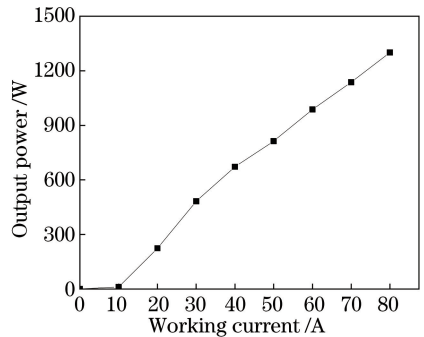


图 6 885 nm 泵浦 LD 阵列输出功率与注入电流的关系曲线

Fig. 6 Output power as a function of injected current for 885-nm pump LD

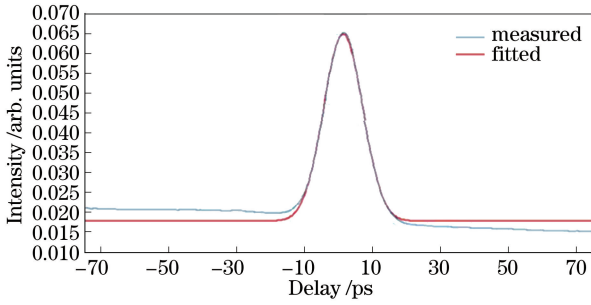


图 7 种子源激光谱线

Fig. 7 Spectra of seed laser

种子源输出激光功率为 4 W,单脉冲能量为 40 μJ ,经过光隔离器、光束整形装置以及偏振片后输入板条增益介质的激光的功率为 2.2 W,光斑整形后的尺寸略大于 Nd:YAG 增益介质端面大小,透射经过 Nd:YAG 晶体后种子源激光功率下降为 1.47 W,第二次与第四次通过 Nd:YAG 晶体后种子源激光功率分别为 1.16 W 与 0.93 W。图 8 为种子源激光经过增益介质单程放大与双程放大后的输出功率与泵浦 LD 阵列注入功率的关系曲线。

种子光经过 Nd:YAG 的单程放大与双程放大后,由于种子源激光相比于 Nd:YAG 材料自身的饱和光强低很多,所以种子激光在增益介质内的增益方式为小信号增益。种子光的功率随着泵浦功率的增加呈指数函数关系增长,当泵浦功率达到 1300 W

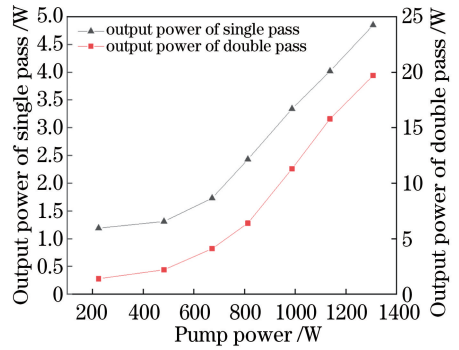


图 8 激光单程与双程放大输出功率与泵浦功率的关系

Fig. 8 Output powers of single-pass and double-pass amplification as functions of pump power

时,种子光单程放大后输出功率为 4.9 W,双程放大后输出功率为 19.7 W。

图 9(a)为实验中种子光经过四程放大后的输出功率以及通过 MATLAB 仿真得到的理论输出功率与注入泵浦功率的关系。当泵浦功率达到 1300 W 时,平均功率为 2.2 W 的皮秒脉冲种子光经过 Nd:YAG 增益介质四程放大后最终输出激光的平均功率为 103 W,激光单脉冲能量为 1.03 mJ,系统光-光转换效率为 7.8%。系统注入种子光功率较低,造成整体能量利用率不足。图 9(b)所示为随着注入种子光功率的提高,理论上系统光-光转换效率的变化。

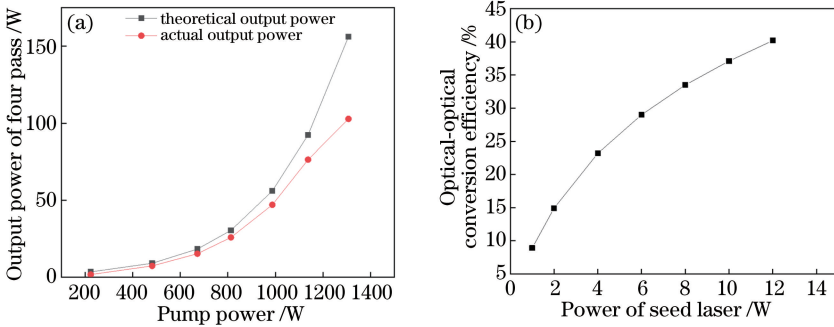


图 9 激光放大系统输出特性曲线。(a)四程放大后,理论输出功率和实际输出功率与泵浦功率的关系;(b)理论上,光-光转换效率与种子光功率的关系

Fig. 9 Output characteristic curves of laser amplifier system. (a) Theoretical and actual output powers as functions of pump power after four-pass amplification; (b) theoretical optical-optical conversion efficiency as a function of power of seed laser

从实验结果与仿真结果中可以看出,激光输出功率随泵浦光功率的增大呈指数增长,系统输出功率未达到饱和状态,进一步提高泵浦光功率可以得到更高功率的皮秒激光输出。在小功率泵浦条件下,实验结果与理论推导结果匹配得较好,随着泵浦功率增大,实验结果与理论结果间差值增加。种子光放大过程中由板条内部热分布不均匀引起的热退

偏效应造成了实验结果与理论推导结果间的差别。图 9(b)显示,随着注入种子光激光功率的提高,理论上相同泵浦条件下放大系统的输出功率随之提高,系统整体的能量利用率也会有明显增大。设计更合理的光束整形系统提高种子光注入板条内部的功率可以有效增大系统的能量利用率,以及进一步提高系统的输出功率。

4 结 论

介绍了一种输出功率达到百瓦级、单脉冲能量为毫焦级的皮秒固体脉冲放大器。采用单块 Nd:YAG 晶体作为增益介质,结合传导冷却端面泵浦板条放大器多角度放大与激光偏振复用技术,实现了对重复频率为 100 kHz、脉冲宽度为 9.6 ps 的种子光的激光功率放大,实现了 103 W 激光功率输出,激光单脉冲能量达到 1.03 mJ。未来可以通过采取双端泵浦的方式增大泵浦功率,通过改进光束整形与光路耦合过程进一步提高系统的输出功率和能量利用率。

参 考 文 献

- [1] Chen F L, Li D H. Mechanisms of short-pulse laser induced damage in dielectric based on Fokker-Planck equation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 334-338.
陈发良, 李东海. 基于 Fokker-Planck 方程的电介质材料短脉冲激光破坏机制分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 334-338.
- [2] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [3] Yoshino T, Seki H, Tokizane Y, *et al.* Efficient high-quality picosecond Nd:YVO₄ bounce laser system[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(4): 894-897.
- [4] Li T Q, Mao X J, Lei J, *et al.* 100 W high beam quality rod-type photonic crystal fiber amplifier for picosecond pulses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(9): 7-11.

- 李天琦, 毛小洁, 雷健, 等. 100 W 高光束质量光子晶体光纤棒皮秒脉冲放大器[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(9): 7-11.
- [5] Zhao M, Hao Q, Guo Z R, *et al.* Compact fiber-solid picosecond laser source with kilohertz repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401010.
赵明, 郝强, 郭政儒, 等. 结构紧凑的 kHz 重复频率光纤-固体皮秒激光光源[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401010.
- [6] Wang Y, Liu B, Ye Z B, *et al.* High peak power and high beam quality fiber-solid hybrid amplification laser system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401007.
汪勇, 刘斌, 叶志斌, 等. 高峰值功率高光束质量光纤-固体混合放大激光系统[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401007.
- [7] Liu B, Liu C, Wang Y, *et al.* 100 MW peak power picosecond laser based on hybrid end-pumped Nd:YVO₄ and side-pumped Nd:YAG amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1601907.
- [8] Frantz L M, Nodvik J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [9] Simmons W, Hunt J, Warren W. Light propagation through large laser systems[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(9): 1727-1744.
- [10] Eggleston J M, Frantz L M, Injeyan H. Derivation of the Frantz-Nodvik equation for zig-zag optical path, slab geometry laser amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(8): 1855-1862.