



·强激光物理与技术·

1.8 mJ 高倍率 Nd:YAG 板条皮秒激光放大器^{*}

王金川^{1,2,3}, 李 密^{1,2}, 杜佳林^{1,2}, 汪 丹^{1,2}, 李腾龙^{1,2},
王君涛^{1,2}, 周唐建^{1,2}, 尚建力^{1,2}, 高清松^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 612900; 2. 中国工程物理研究院 高能激光科学与
技术重点实验室, 四川 绵阳 612900; 3. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100088)

摘 要: 设计了一种高倍率的固体皮秒脉冲激光放大器, 采用 Nd:YAG 板条作为激光增益介质。借助板条结构的角选通结构, 搭建了板条五通放大系统, 实现了对注入皮秒脉冲激光的高倍率放大。种子源工作在脉冲模式, 放大器泵浦源在连续模式工作。皮秒光纤激光器可以在不同的重复频率下工作, 脉冲宽度为 13.4 ps。种子光经过隔离和耦合系统之后, 注入板条的单脉冲能量为 25 nJ。当种子源工作重复频率为 24.46 MHz 时, 板条放大器输出平均功率 377 W, 单脉冲能量 15.5 μ J; 当种子源工作重复频率为 49.8 kHz 时, 板条放大器输出平均功率 89 W, 单脉冲能量 1.8 mJ, 峰值功率为 134 MW, 放大倍率达到 7.2×10^4 。

关键词: 激光器; 皮秒激光; 固体激光器; 高倍率; 五通放大

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210562

1.8 mJ high magnification Nd:YAG slab picosecond laser amplifier

Wang Jinchuan^{1,2,3}, Li Mi^{1,2}, Du Jialin^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Li Tenglong^{1,2},
Wang Juntao^{1,2}, Zhou Tangjian^{1,2}, Shang Jianli^{1,2}, Gao Qingsong^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 612900, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 612900, China;

3. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: In this study, we design a high-magnification solid-state picosecond pulse laser amplifier in which the gain medium is Nd:YAG slab. We achieve the five-pass amplification of the picosecond pulse laser through the slab multi-angle magnification technology. The seed source works in pulse mode, and the amplifier pump works in continuous mode. Picosecond fiber laser can work at different repetition rates with 13.4 ps pulse duration. After the seed laser passes through the isolation and coupling system, the single-pulse energy injected into the slab is 25 nJ. When repetition frequency of the seed source is 24.46 MHz, the output power is 377 W, the single-pulse energy is 15.5 μ J. When repetition frequency of the seed source is 49.8 kHz, a laser output power of 89 W is obtained with single-pulse energy 1.8 mJ and peak power 134 MW. The magnification is up to 7.2×10^4 .

Key words: laser, picosecond laser, solid-state laser, high magnification, five-pass amplification

高能量、高峰值功率皮秒级脉冲激光器在激光测距^[1-2]和工业加工^[3-4]等领域具有广阔的应用前景。由于谐振腔输出的皮秒激光峰值功率受限, 通常采用主振荡功率放大(MOPA)结构实现高峰值功率的激光输出。MOPA结构将激光产生与功率放大过程分开, 振荡器产生低能量的种子光, 放大器再将其放大, 从而获得高能量、高峰值功率的激光输出。板条结构的激光增益介质散热面积大, 可以获得良好散热效果, 能够有效减少介质中的热畸变与热应力, 降低介质中的温度梯度^[5-6]。此外, 板条型增益介质易于实现空间结构的多通放大, 从而获得高倍率的激光放大, 因此板条激光器一直是高功率激光领域的重要研究方向^[7-10]。

2016年, 浙江大学的沈利津等人^[11]报道了一种基于双通掠入射 Nd:YVO₄ 板条的皮秒激光放大器, 种子光平均

* 收稿日期: 2021-12-15; 修订日期: 2022-02-18

基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金项目(C-2021-CX20200030)

联系方式: 王金川, chuanjinwang718@foxmail.com。

通信作者: 王君涛, wjt_caep@126.com。

功率为 10 mW、脉宽为 90 ps、脉冲重复频率 100 kHz, 在 55 W 的泵浦功率下, 放大输出平均功率 13 W, 单脉冲能量 130 μ J, 放大倍率为 1.3×10^3 。同年, 中国科学院大学的 Chen Y 等人^[12] 设计了 Nd:YAG 板条的皮秒脉冲激光放大器, 该放大器由板条三通放大器、板条双通放大器和板条单通放大器组成。注入种子光能量 0.4 mJ, 板条放大器输出 8.2 mJ, 实现了 41 W 的输出平均功率, 峰值功率为 324 MW, 脉宽为 25.3 ps。2018 年, Chen W 等人^[13] 报道了一种光纤-固体混合皮秒脉冲激光器, 由锁模光纤种子源、端面泵浦 Nd:YVO₄ 方棒双通预放大器和侧泵 Nd:YVO₄ 板条放大器组成。种子源在 500 kHz 时输出单脉冲能量 1.2 nJ, 经过 2 个预放大器输出单脉冲能量 180 nJ, 经过板条放大器 10 程放大后输出单脉冲能量 40 μ J, 板条放大器的放大倍率为 222, 输出平均功率 19.8 W, 脉宽 10.89 ps。同年, KUZNETSOV 等人^[14] 报道了基于 Yb:YAG 单晶光纤的大能量皮秒激光器, 采用 MOPA 结构, 光纤种子源的输出功率为 3 W, 重复频率为 3 MHz, 脉宽为 300 fs, 预放为双通放大的 Yb:YAG 单晶光纤, 主放为四通放大的 Yb:YAG 单晶光纤。输出平均功率 28 W, 在 11.5 kHz 下对应的单脉冲能量 2.4 mJ, 压缩后脉冲宽度为 2.8 ps, 峰值功率 870 MW。2019 年, 华北光电技术研究所的董彬等人^[15] 报道了一种 100 W 级的皮秒激光放大器, 采用“zig-zag”Nd:YAG 板条作为增益介质, 通过角度选通和偏振双通, 实现了对皮秒脉冲激光的四通放大。在注入种子光平均功率为 4 W、重复频率为 100 kHz、脉宽为 9.6 ps 的工作条件下, 放大输出激光功率为 103 W, 单脉冲能量达到 1.03 mJ, 放大倍率为 25 倍。2021 年, Javed F 等人^[16] 报道了一种端面泵浦的 Nd:YAG Innoslab 皮秒激光放大器, 锁模种子源输出平均功率 6 W, 重复频率 1 MHz 的种子光, 注入板条的功率为 4.5 W。在 965 W 的泵浦功率下, 经过 11 通的放大, 得到平均功率为 165 W、重复频率为 1 MHz、脉宽为 12 ps 皮秒激光输出, 单脉冲能量为 165 μ J, 放大倍率为 36 倍。同年, 北京工业大学的董雪岩等人^[17] 报道了一种光纤-固体混合皮秒 Nd:YAG Innoslab 放大器, 系统包括全光纤放大器、端面泵浦双通放大器以及 Innoslab 放大器, 在 Innoslab 放大器中, 设计并搭建了八通放大光路, 光纤种子源输出平均功率 1.5 W、重复频率 18.9 MHz、脉宽为 9.4 ps 的皮秒激光, 经过端面泵浦的双通放大器之后, 平均功率被放大至 5.5 W, 在 117 W 的泵浦功率下, 八通 Innoslab 放大器将平均功率放大至 28.4 W, 输出光脉宽为 10.6 ps, 整个系统对种子光的放大倍率为 19 倍。

本文采用具有角度选通特性的“zig-zag”Nd:YAG 板条, 设计了五通放大结构的皮秒脉冲激光放大器。皮秒光纤激光器可以在不同的重复频率下工作, 脉冲宽度为 13.4 ps。种子光经过隔离耦合系统之后, 注入板条的单脉冲能量为 25 nJ。当种子源工作重复频率为 24.46 MHz 时, 注入功率为 0.61 W, 板条放大器输出平均功率 377 W, 单脉冲能量 15.5 μ J, 光-光转换效率为 16.4%; 当种子源工作重复频率为 49.8 kHz 时, 板条放大器输出平均功率 89 W, 单脉冲能量 1.8 mJ, 峰值功率为 134 MW, 放大倍率达到 7.2×10^4 。在同等重复频率与脉宽的条件下, 这是目前能够查询到的单个板条激光放大器可以实现的最高放大倍率。

1 实验设计与理论计算

1.1 系统放大原理

种子光在板条中的 zig-zag 传输光路示意图如图 1 所示。

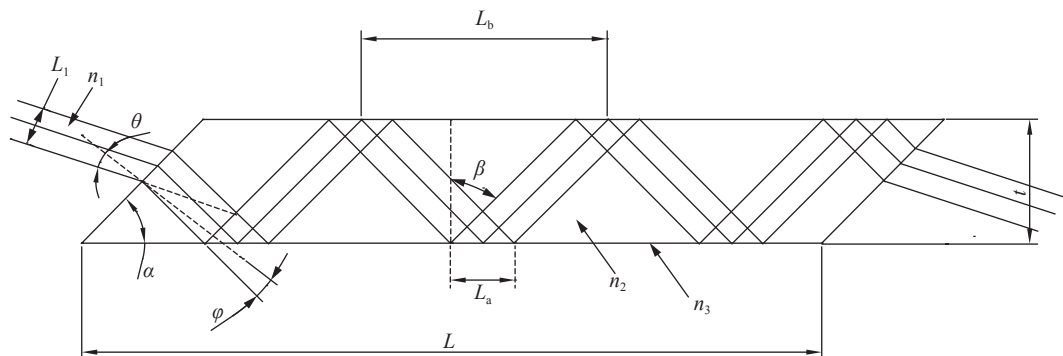


Fig. 1 Optical path of laser beam in zig-zag slab

图 1 Zig-zag 板条光路示意图

为使激光在板条内部传输和从板条端面出射时的损耗达到最小, 激光在板条中传输时必须满足两个条件: 大面全反射和传播周期为整数。不考虑光束在非掺杂区与掺杂区域的传输差异, 根据光束传输的折射和反射定律有

$$L = NL_b = 2Nt \tan \beta \quad (1)$$

$$\sin \varphi = \sin \theta / n_2 \quad (2)$$

$$\beta = \alpha + \varphi \quad (3)$$

式中: L 为板条的长度; L_b 为光束在板条内部一个传播周期的长度; N 为光束在板条内部传播的周期数; t 为板条的厚度; α 为板条的端面切角; β 为光线在大面上的反射角; φ 为入射光线在端面上的折射角; θ 为入射光在端面上的入射角; 满足大面全反射和 N 为整数的入射角称为选通角; n_2 为板条介质内的折射率。

对于长×宽×厚为 150 mm×10 mm×2.5 mm 的板条, 在端面切角为 45°时, 不同的传输周期数对应的选通角如表 1 所示。

根据计算, 选取 45.9°, 42.1°, 38.5°, 34.4°和 31.2°作为选通角。

在 Nd:YAG 晶体中, 小信号增益系数 g_0 可表示为

$$g_0 = \frac{\eta_{ASE}\eta_T\eta_Q\eta_S\eta_B P_{ab}}{I_s V} \quad (4)$$

式中: η_{ASE} 为自发辐射损耗效率; η_T 为泵浦光耦合效率; η_Q 为量子效率; η_S 为斯托克斯因子; η_B 为交叠效率; P_{ab} 为晶体吸收的抽运光总功率; I_s 为饱和功率密度; V 为增益区的体积。

对于双端抽运板条介质, 增益区中每一点处的抽运吸收光强可表示为

$$I(x) = 0.5I_p \{ \exp(-\alpha_e x) + \exp[-\alpha_e(L-x)] \} \quad (5)$$

式中: I_p 为双端抽运的总光强; α_e 为增益区对抽运光的吸收系数; L 为增益区长度。

对于长×宽×厚为 150 mm×10 mm×2.5 mm、长度方向上中心 120 mm 为增益区的板条, 结合式(4)、式(5), 双端连续抽运源总功率为最高 2300 W, 使用 Matlab 进行模拟计算, 得到双端抽运增益区内的小信号增益系数分布如图 2 所示。

两端的小信号增益系数最高, 达到 0.237 cm⁻¹; 增益区中心处最低, 为 0.112 cm⁻¹。当种子光处于 24.46 MHz 的高重复频率下, 可将脉冲激光简化为连续激光进行理论模拟计算。

根据式(4)、式(5), 将增益区分为若干段小区域, 假设种子光注入板条的平均功率为 0.61 W, 分别计算双通放大、三通放大、四通放大和五通放大时增益区内各个位置上的放大功率, 其理论功率曲线如图 3 所示。

根据以上计算可知, 当种子光进入板条的平均功率为 0.61 W, 双端泵浦功率为 2300 W 时, 双通放大输出功率为 20.5 W, 光-光转换效率为 0.09%; 三通放大输出功率为 95.4 W, 光-光转换效率为 4.1%; 四通放大输出功率为 257 W, 光-光转换效率为 11.2%; 五通放大输出功率为 424 W, 理论光-光转换效率达到 18.4%。由于种子光注入功率太低, 前几个通次的放大提取效率很低, 随放大通次增加, 进入板条的激光光强增大, 光-光转换效率和输出功率都得到大幅提升。

1.2 实验装置

根据以上的理论计算与分析, 设计并搭建了双端泵浦的五通放大皮秒板条激光放大器, 实验装置如图 4 所示。

采用光纤激光器作为种子源, 脉宽为 13.4 ps, 单脉冲能量为 40 nJ; 重复频率可调, 最高工作频率为 24.46 MHz, 最低工作频率为 49.8 kHz, 中心波长为 1064.46 nm, 其输出光谱曲线如图 5 所示。

为防止放大器内的回光损伤种子源, 保持系统的稳定, 在放大器和种子源之间加入了法拉第磁光隔离器。通过光束整形系统, 实现种子光与板条端面尺寸的匹配。整形后的种子光经过反射镜 M_1 , M_2 之后进入板条。Nd:YAG 晶体板条的长×宽×厚为 150 mm×10 mm×2.5 mm, 长度方向上中心 120 mm 为增益区, 两端各有长 15 mm 的非掺杂 YAG 端帽, 板条端面切角为 45°, 掺杂原子分数为 0.1%, 泵浦吸收效率为 93.7%, 板条大面与微通道冷却器

表 1 不同的传播周期与其对应的选通角

Table 1 Incident angle (θ) for different propagation cycle (N)

N	$\theta/(^\circ)$
12	45.9
13	42.1
14	38.5
15	34.4
16	31.2
17	28.2
18	25.4
19	23.6

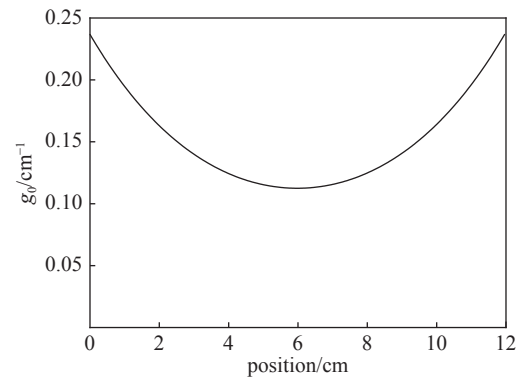


Fig. 2 Theoretical result of small signal gain coefficient distribution

图 2 增益区内不同位置处的小信号增益系数

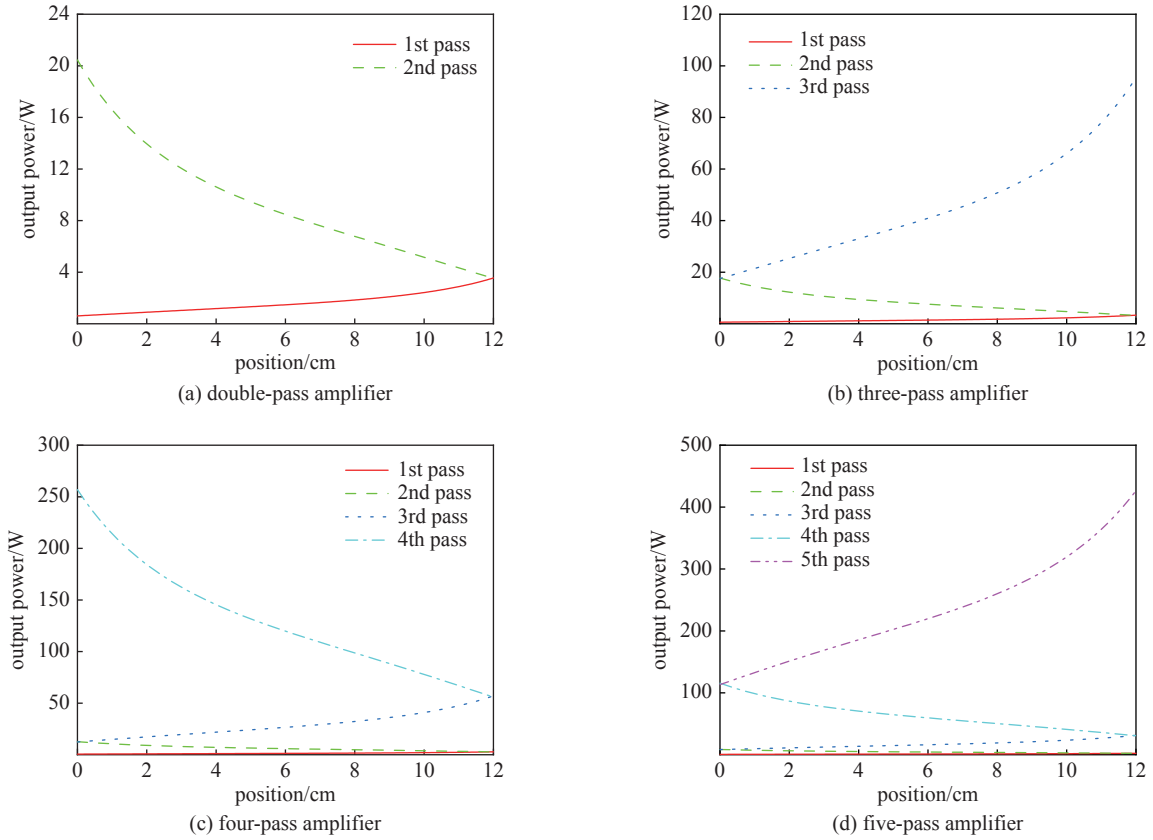


Fig. 3 Power distribution of different positions within slab
图 3 材料内部功率随位置变化

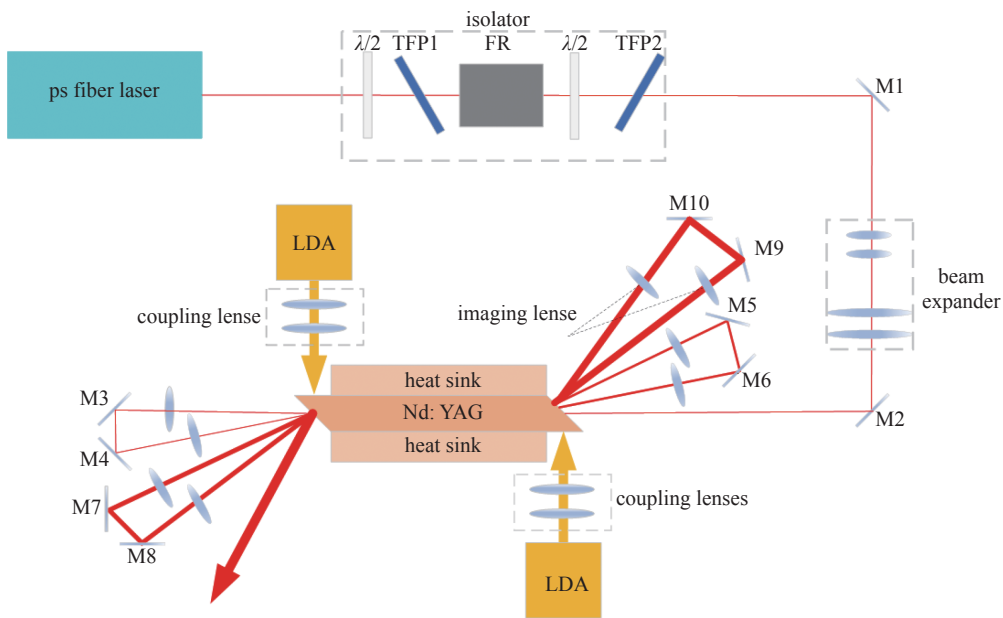


Fig. 4 Schematic of experimental setup
图 4 高倍率激光放大器实验装置示意图

采用焊接,实现良好冷却。泵浦源为中心波长 808 nm 的连续半导体激光阵列 (LDA), 双端对称。在 LDA 和板条中间加入由柱透镜、石英波导和偏振元件组成的泵浦耦合系统,使泵浦光在 y 方向更加均匀,并使泵浦光光束与板条端面尺寸匹配。实验中, LDA 最大工作电流为 100 A, 此时泵浦总功率达到 3126 W。

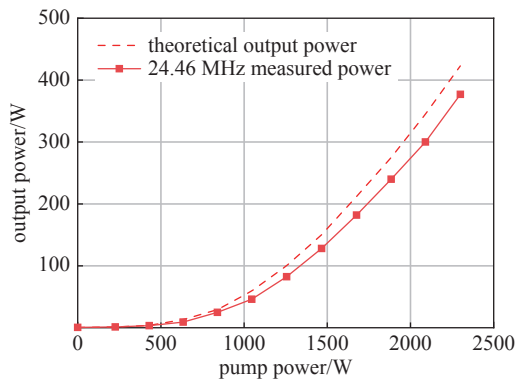
由于光束在不同的放大通次间会自由传输一段距离,传输过程中的衍射效应将导致光斑展宽,造成激光再次进入板条时的切光损耗。此外,光束的光强分布也会在传输过程中随距离的变化而变化,光斑在板条出口的

均匀分布变得不再均匀,导致光斑无法在板条中形成均匀的能量提取。为避免出现上述情况,在板条增益介质的入口与出口之间加入4F像传递系统,减小激光传输过程中的损耗和畸变。

2 实验结果与分析

种子光经过隔离系统和扩束系统以及板条端面的切光损耗之后,板条注入单脉冲能量为25 nJ,单次通过板条后的单脉冲能量为23 nJ,5次通过板条后的单脉冲能量减小为19.6 nJ,损耗主要来自于种子光在板条中的散射损耗和端面的衍射损耗。

调整完毕后,为了测试不同重复频率种子光下放大系统的放大能力,使种子源分别工作在24.46, 4.89, 2.038, 1.019, 0.500, 0.200, 0.0994和0.0498 MHz的重复频率下,放大后的输出功率如图6所示。



(a) theoretical and measured output power varies with pump power

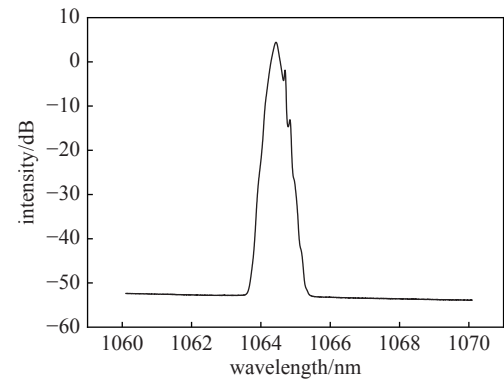
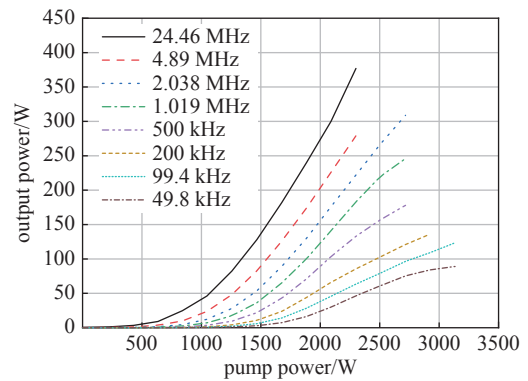


Fig. 5 Spectra of seed laser

图5 种子源输出光谱



(b) measured output power varies with pump power

Fig. 6 Output characteristic curves of laser of five-pass amplification

图6 五通放大系统输出特性曲线

如图6(a)所示,将实测数据与理论计算曲线对比,种子光工作重复频率为24.46 MHz时理论输出功率可以达到424 W,实际输出为377 W,实验结果与理论推导结果相近。如图6(b)所示,当种子光在单脉冲能量不变的条件下将重复频率提高,单脉冲泵浦储能周期缩短,输出单脉冲能量和放大倍率随之降低,但由于种子光注入功率的增加,系统整体能量利用效率增加,输出功率和光-光转换效率都随之提升。当种子源工作重复频率为49.8 kHz、泵浦功率为3126 W、注入平均功率为1.25 mW时,经过五通放大后的输出功率为89 W,单脉冲能量达到最高的1.8 mJ,单脉冲能量放大倍率最高达到 7.2×10^4 ,但光-光转换效率只有2.9%。当种子源工作重复频率为99.4 kHz、注入平均功率为2.5 mW、泵浦功率为3126 W时,输出光平均功率为123 W,单脉冲能量为1.23 mJ,放大倍率为 4.9×10^4 ,光-光转换效率为3.9%。当种子光的工作频率为24.46 MHz、注入平均功率提升至0.61 W、泵浦源输出功率为2300 W时,得到最高输出平均功率377 W,单脉冲能量15.5 μ J,光-光转换效率提升至16.4%,放大倍率为620。但由于入口处的注入功率密度依然远远小于Nd:YAG的饱和功率密度,在增益介质储能期间,大量的激活粒子不能被用于放大,这些粒子向下能级跃迁,形成了较强的放大自发辐射(ASE),导致系统对泵浦能量的利用效率降低。图7中49.8 kHz曲线在泵浦功率提高到1359 W时,斜率明显下降,也是因为种子源注入功率太小,储能不能被及时消耗,ASE显著增强。

角度多通板条放大器可以使种子光多次通过增益介质进行放大,随着通次的增大,板条内部的功率密度不断提升,对于泵浦能量的利用更加充分,放大功率和光-光转换效率较之低通次也得到大幅度的提升,最终获得 7.2×10^4 的高倍率放大输出。此外,多通放大光路的设计增加了种子光与泵浦光在晶体中的重叠面积,能够有效提高提取效率。实验证明,这种多通次结构的放大器可以有效提高放大倍率,使输出功率和转换效率得到了提高,但由于注入功率太小,ASE效应较为显著,系统的光-光转换效率仍然较低。为进一步抑制ASE效应,提高系统对泵

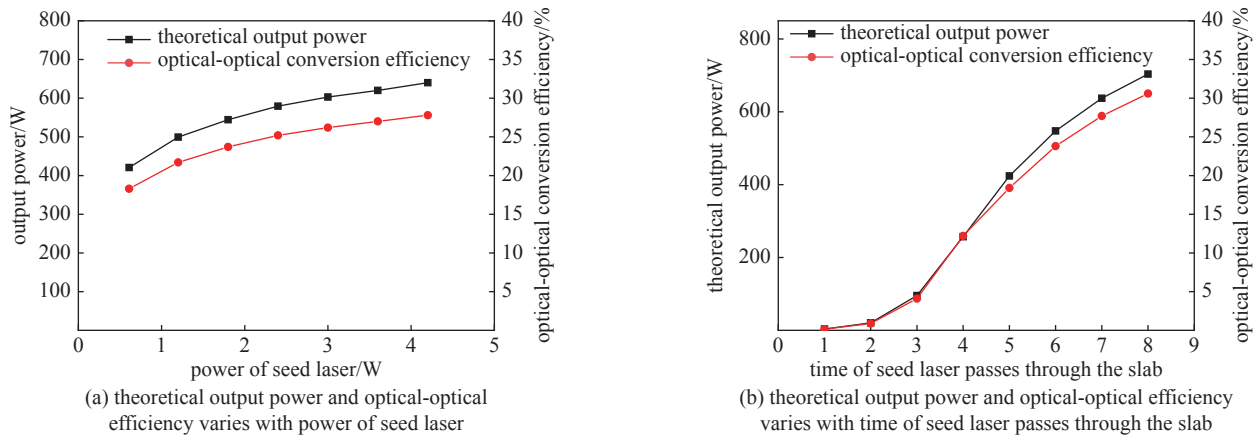


Fig. 7 Output characteristic curves of laser amplifier system

图 7 激光放大系统输出特性曲线

浦能量的提取效率,以获得更高的输出功率和光-光转换效率,在后续的工作中应当增加种子光的注入功率和放大通次数量。根据理论计算结果,如图 7(a)所示,在五通放大系统中,随注入种子光功率增大,放大输出功率也相应增大,增长速度逐步减缓,在泵浦功率为 2300 W 的条件下,当种子光注入功率提升到 4.2 W 时,理论输出功率可以达到 640 W,此时光-光转换效率达到 27.7%。如图 7(b)所示,在种子光注入功率为 0.61 W、泵浦功率不变的条件下,当放大通次数量达到 8 次时,理论输出功率能够达到 703.6 W,光-光转换效率提升至 30.6%。

3 结论

采用“Zig-Zag”Nd:YAG 板条作为增益介质,利用角度选通特性,设计并搭建了一种五通放大的高功率固体皮秒脉冲激光放大器。种子光脉宽为 13.4 ps,板条注入单脉冲能量为 25 nJ,在不同的重复频率下进行了激光放大验证。当种子源工作重复频率为 24.46 MHz 时,输出平均功率为 377 W,单脉冲能量 15.5 μ J,光-光转换效率达到 16.4%。当种子源工作重复频率为 49.8 kHz 时,获得平均功率 89 W,单脉冲能量 1.8 mJ 皮秒激光输出,峰值功率为 134 MW,脉冲能量放大倍率达到 7.2×10^4 ,实验表明这种多通次放大的方法能够实现高倍率的脉冲激光放大。

参考文献:

- [1] 李欣,王培源,邹彤,等. kHz激光器在武汉卫星观测站的测距实验[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 367-370. (Li Xin, Wang Peiyuan, Zou Tong, et al. Experiment on kHz laser ranging at Wuhan satellite laser ranging station[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 367-370)
- [2] 邓华荣,张海峰,龙明亮,等. 4kHz重复频率卫星激光测距系统及其应用[J]. *光学学报*, 2019, 39: 0314002. (Deng Huarong, Zhang Haifeng, Long Mingliang, et al. 4kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0314002)
- [3] 叶君建,谢志勇,黄秀光,等. 皮秒激光在激光状态方程靶制备中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 022009. (Ye Junjian, Xie Zhiyong, Huang Xiuguang, et al. Application of picosecond laser processing to target fabrication in equation of state experiments[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 022009)
- [4] 刘洋,余锦,张雪,等. 皮秒激光加工系统设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40: s103001. (Liu Yang, Yu Jin, Zhang Xue, et al. Design and experimental study of picosecond laser machining system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40: s103001)
- [5] Ma Zhe, Li Daijun, Gao Jiancun, et al. Thermal effects of the diode end-pumped Nd: YVO₄ slab[J]. *Optics Communications*, 2007, 275(1): 179-185.
- [6] 雷呈强,汪岳峰,侯军燕,等. 端面抽运复合结构板条介质热效应分析[J]. *应用激光*, 2011, 31(2): 164-167. (Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Hou Junyan, et al. Thermal effect analysis of LD end-pumped composite slab[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(2): 164-167)
- [7] Chen Xiaoming, Lu Yanhua, Hu Hao, et al. Narrow-linewidth, quasi-continuous-wave ASE source based on a multiple-pass Nd: YAG zigzag slab amplifier configuration[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5602-5608.
- [8] Kane T J, Eggleston J M, Byer R L. The slab geometry laser—Part II: thermal effects in a finite slab[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, 21(8): 1195-1210.
- [9] Guo Chuan, Zuo Junwei, Bian Qi, et al. Compact, high-power, high-beam-quality quasi-CW microsecond five-pass zigzag slab 1319 nm amplifier[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3445-3448.
- [10] Shin J S, Cha Y H, Lim G, et al. Wavefront improvement in an end-pumped high-power Nd: YAG zigzag slab laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19309-19319.
- [11] 沈利洋,姜洪波,赵志刚,等. 掠入射Nd: YVO₄板条结构皮秒激光放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43: 1101004. (Shen Lifeng, Jiang Hongbo, Zhao Zhigang, et al. Experimental study of picosecond laser amplifier based on grazing incidence Nd: YVO₄ slab geometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43: 1101004)

1101004)

- [12] Chen Ying, Liu Ke, Yang Jing, et al. 8.2 mJ, 324 MW, 5 kHz picosecond MOPA system based on Nd: YAG slab amplifiers[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18: 075503.
- [13] Chen Wei, Liu Bowen, Song Youjian, et al. High pulse energy fiber/solid-slab hybrid picosecond pulse system for material processing on polycrystalline diamonds[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: E18.
- [14] Kuznetsov I, Mukhin I, Palashov O, et al. Thin-rod Yb: YAG amplifiers for high average and peak power lasers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3941-3944.
- [15] 董彬, 刘磊, 唐晓军, 等. 100W高功率Nd: YAG皮秒板条激光放大器[J]. *中国激光*, 2019, 46: 1101004. (Dong Bin, Liu Lei, Tang Xiaojun, et al. 100-W high-power Nd: YAG picosecond laser-slab amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46: 1101004)
- [16] Javed F, Zhang Hengli, Li Xiaowen, et al. 165 W, 1 MHz diode-pumped Nd: YAG Innoslab picosecond amplifier[C]//Proceedings of SPIE 11849 Fourth International Symposium on High Power Laser Science and Engineering (HPLSE 2021). 2021: 118490T.
- [17] 董雪岩, 李平雪, 李舜, 等. 高光束质量高重复频率光纤-固体混合皮秒Innoslab放大器[J]. *中国激光*, 2021, 48: 1701004. (Dong Xueyan, Li Pingxue, Li Shun, et al. High beam quality fiber-solid hybrid Innoslab picosecond amplifier with high repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 1701004)