

长脉宽大能量 Yb:YAG 平面波导激光放大器

刘东升^{1,2,3}, 王金川^{1,2,3}, 徐浏^{1,2}, 杜佳林^{1,2}, 何平^{1,2}, 谭亮^{1,2}, 王亚楠^{1,2},
汪丹^{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 621900;

³中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 搭建了 1030 nm 波长的准连续长脉宽室温 Yb:YAG 平面波导激光放大器, 分析对比注入光强、抽运光强和抽运脉宽等因素对光-光转换效率的影响。采用主振荡功率放大结构, 种子源为 1030 nm 连续保偏光纤激光器。放大器增益介质为一块 Yb:YAG 平面波导, 抽运源为两个准连续 940 nm 半导体激光阵列, 抽运光经整形后分别从两个端面耦合进入平面波导。在双端抽运下, 抽运重复频率为 400 Hz 和最大峰值功率为 20.4 kW 时获得了最大能量为 4.65 J 的激光放大输出, 偏振度为 97%, 光-光转换效率为 44.0%, 与理论分析基本吻合。

关键词 激光器; 激光放大器; 1030 nm; 平面波导; Yb:YAG

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1601004

1 引言

激光二极管阵列抽运的大能量全固态激光器(DPSSL)具有结构紧凑、效率高、稳定性好等优点, 在科学研究、军事、工业加工等领域具有良好的应用价值和前景, 在近十几年中获得了高速发展。2010年, 王明哲等^[1]通过低温条件抑制 Yb:YAG 热效应的方式, 选用 Yb:YAG 板条作为增益介质, 搭建了低温 V 型谐振腔, 在抽运脉冲宽度 1 ms、重复频率 10 Hz 条件下获得了 3.3 J 的激光输出。2014 年岱钦等^[2]利用 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合微片晶体设计了被动调 Q 微片激光器, 采用主振荡加两级放大结构, 获得了脉宽 1.28 ns、单脉冲能量 120 mJ 的 1064 nm 激光输出。2018 年, 靳全伟等^[3]采用棒状 Nd:YAG 增益介质搭建了主振荡功率放大(MOPA)激光器, 在重复频率 400 Hz 下实现了脉冲能量 712 mJ、脉宽 12.4 ns 的 1064 nm 激光输出, 光-光效率为 27.7%, 光束质量 M^2 小于 2.3。2019 年张伟桥等^[4]采用激光二极管阵列双端双程

抽运 Yb:YAG 板条, 搭建了准连续工作下的激光振荡器, 在抽运光重复频率 400 Hz、脉宽 1 ms 条件下获得了单脉冲能量 6.13 J 的激光输出, 光-光效率约为 50%。同年, 刘学胜等^[5]研制了激光二极管抽运的 Nd:YAG 棒状激光器, 采用主振荡加两级放大结构, 在重复频率 10 Hz 条件下, 得到脉冲宽度 10 ns、最大单脉冲能量 1085 mJ 的激光输出。

高效率的高平均功率全固态激光器一直是固体激光器追求的发展方向。平面波导结构增益介质是光纤激光增益介质和板条激光增益介质的中间状态, 它只产生一维的热流方向和热梯度, 可以更有效地抑制热效应^[6-7]。平面波导结构可以实现高通量的注入激光和高通量抽运激光, 因此平面波导激光器是一种很有潜力的实现高效率高平均功率输出的激光技术。2010 年, Thomson 等^[8]在非稳腔中采用 Yb:YAG 平面波导作为增益介质, 获得了 400 W 的连续激光输出。2016 年, Wang 等^[9]报道了一种准连续平面波导激光器, 基于棒状 Nd:YAG 的振荡器作为种子源, 采用 Nd:YAG 平面波导激光

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-01-28; 录用日期: 2021-02-22

基金项目: 中物院创新发展基金创新项目(C-2021-CX20200030)

通信作者: *wji_caep@126.com

放大器,在重复频率 100 Hz、脉宽 192 μs 条件下获得了单脉冲能量 944 mJ 的激光输出,光-光效率高 52%。2017 年, Wang 等^[10]报道了一种连续平面波导激光器,基于 1064 nm 线偏光纤激光器作为种子源,采用 Nd:YAG 平面波导激光放大器,实现了 1.5 kW 的连续激光输出,光-光效率为 49%,两个方向的光束质量 M^2 分别为 2.8 和 7.0。同年,陈月健等^[11]搭建了准连续的 Nd:YAG 平面波导激光振荡器,在重复频率 100 Hz、抽运脉宽 240 μs 条件下,获得了最大单脉冲能量为 928 mJ、脉宽 240 μs 的激光输出,光-光转换效率为 53.2%。

本文搭建了准连续室温 Yb:YAG 平面波导激光器,并分析了平面波导激光放大器的光-光转换效率影响因素。将 Yb:YAG 平面波导晶体作为激光放大器增益介质,波长 940 nm 的激光二极管阵列(LDA)作为抽运源。在抽运脉宽 500 μs ,重复频率 50,250,400 Hz 时均实现了单脉冲能量最大 4.65 J 的 1030 nm 准连续激光放大输出。

2 实验装置及理论分析

平面波导增益介质具有特殊的复合结构,介于板条和光纤之间。平面波导在厚度上为波导结构,其芯层厚度通常在几十微米到几百微米。平面波导热应力模型表明,在波导厚度一定的条件下,波导可承受的热负载功率与芯层厚度的关系呈负相关,即芯层厚度越大,波导可承受的热负载功率越小。因此,理论上平面波导芯层厚度越小越好。考虑实际工艺加工难度,实验采用的平面波导结构尺寸为 1 mm \times 30 mm \times 111 mm,如图 1 所示。芯层为 Yb:YAG,其尺寸为 0.1 mm \times 30 mm \times 100 mm,包层为 0.45 mm \times 30 mm \times 100 mm 的 YAG,两端各有 5.5 mm 长的非掺杂 YAG 端帽。

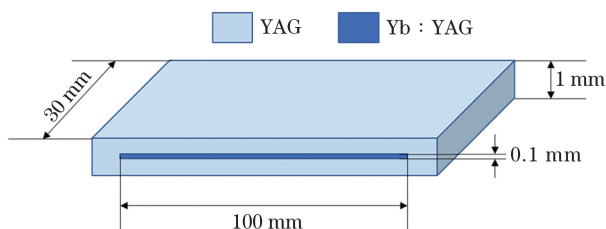


图 1 平面波导结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of planar waveguide

图 2 为 1030 nm 激光放大器实验装置示意图,它由光纤种子源、隔离器、Yb:YAG 平面波导增益介质、扩束器、抽运源和抽运耦合系统组成。选用连续 1030 nm 保偏光纤激光器作为种子源,种子光经

耦合系统后经过隔离器,保证种子源安全稳定工作。种子光扩束后,经耦合系统从端面进入 Yb:YAG 平面波导。抽运源选用 940 nm 激光二极管阵列,平面波导增益模块采用双端倾斜抽运方式。抽运光通过抽运耦合系统后以一定的角度从平面波导端面耦合进入增益介质内部。平面波导大面与铜微通道热沉之间采用焊接方式,确保冷却水能有效地传导平面波导产生的热。

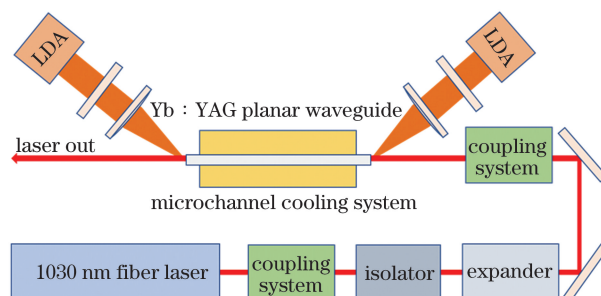


图 2 1030 nm 激光放大器光路示意图

Fig. 2 Schematic of 1030 nm laser amplifier

Yb:YAG 激光材料具有量子亏损小、产热比低和储能高等特点,但室温下 Yb:YAG 为准三能级结构激光介质,需要高强度注入和高强度抽运才能获得高效率激光输出。双端抽运 Yb:YAG 平面波导可以同时实现高强度注入和高强度抽运,因此易于获得高效率激光输出。为探究室温下 Yb:YAG 平面波导激光放大器光-光转换效率影响因素,通过建立 Yb:YAG 激光动力学理论模型进行模拟仿真,分析计算种子光注入光强、抽运光强和抽运时间对光-光转换效率的影响。

Yb:YAG 为准三能级结构,其能级结构如图 3 所示。由于发生斯托克斯分裂,基态能级存在 4 个子能级,激发态有 3 个子能级。能级间的粒子跃迁集中在基态能级 $^2F_{7/2}$ 的 10327 cm^{-1} 斯托克斯能级和 $^2F_{5/2}$ 的 612 cm^{-1} 能级之间,产生 1030 nm 激光辐射。

在一定注入激光和抽运条件下,上能级粒子数

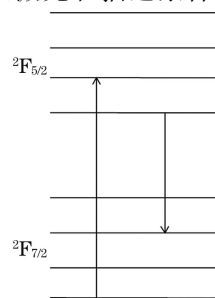


图 3 Yb:YAG 激光跃迁能级图

Fig. 3 Yb:YAG laser transition energy level diagram

N_u 随时间变化关系式为

$$\frac{dN_u}{dt} = \sigma_p c \Phi_p \Delta N_p - \frac{N_u}{\tau_u} - \sigma_l c \Phi_l \Delta N_l, \quad (1)$$

式中: σ_l 和 σ_p 分别为激光发射截面和抽运光吸收截面; ΔN_l 和 ΔN_p 分别为激光粒子数变化和抽运光粒子数变化; Φ_l 和 Φ_p 分别为注入光子数密度和抽运光子数密度。 Φ_l 和 Φ_p 均可按光子数密度 Φ_i 求解, 即

$$\Phi_i = I^k / ch\nu_k. \quad (2)$$

ΔN_l 和 ΔN_p 表达式为

$$\Delta N_p = f_{li} N_l - f_{uj} N_u = N_{yb} (f_{li} + f_{uj}) (f_p - X_u), \quad (3)$$

$$\Delta N_l = f_{um} N_u - f_{ln} N_l = N_{yb} (f_{lm} + f_{un}) (X_u - f_l), \quad (4)$$

$$f_p = \frac{f_{li}}{f_{li} + f_{uj}}, \quad (5)$$

$$f_l = \frac{f_{lm}}{f_{lm} + f_{un}}, \quad (6)$$

$$X_u = \frac{N_u}{N_{yb}}, \quad (7)$$

式中: f_{li} 、 f_{uj} 、 f_{um} 、 f_{lm} 、 f_{un} 分别为对应能级的玻尔兹曼分布系数; N_{yb} 为总粒子数; X_u 为上能级粒子数比例。

Yb:YAG 对抽运光的吸收方程为

$$\frac{dI_p(t, x, y, z)}{I_p(t, x, y, z)} = -\epsilon' \alpha_0 [f_p - X_u(t, x, y, z)] dz, \quad (8)$$

式中: ϵ 为光的传播方向; α_0 为吸收系数。

$$\alpha_0 = \sigma_p N_{yb} (f_{li} + f_{uj}). \quad (9)$$

激光增益方程可表示为

$$\frac{dI_1^e(t, x, y, z)}{I_1^e(t, x, y, z)} = \epsilon g_0 [X_u(t, x, y, z) - f_l] dz, \quad (10)$$

$$g_0 = \sigma_l N_{yb} (f_{lm} + f_{un}), \quad (11)$$

式中: g_0 为小信号增益。联立上述关系式, 可利用计算机迭代求解。

在抽运脉宽 500 μ s、抽运峰值功率 20.4 kW 条件下, 不同注入光强下瞬时输出功率随时间的变化曲线如图 4 所示。在每个抽运脉冲的初始阶段, 功率迅速提升, 然后进入稳定提取阶段。种子光功率越高即注入光强越大, 越早进入稳态提取阶段, 稳态阶段的光-光效率越高, 单脉冲光-光效率也越高, 但稳态光-光效率的增幅在逐渐减小。在抽运峰值功率 20.4 kW 下, 注入峰值 220 W 时理论输出单脉冲能量 4.56 J, 注入光强 7.3 kW·cm⁻² 时单脉冲光-光效率和稳态光-光效率分别为 43.6% 和 55.9%; 注入峰值 1120 W 时理论输出单脉冲能量 5.94 J, 注入光强 37.3 kW·cm⁻² 时单脉冲光-光效率和稳态光-光效率分别为 52.7% 和 66.5%。

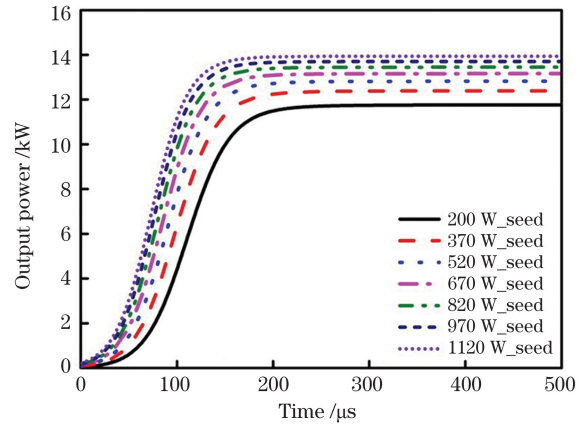


图 4 不同种子光强下瞬时输出功率曲线

Fig. 4 Instantaneous output power curves under different seed light intensities

表 1 不同注入光强下的输出结果

Table 1 Output results under different injected laser intensities

Input power of seed laser /W	Input laser intensity / (kW·cm ⁻²)	Time from 0 to 90% of steady state power / μ s	Output energy /J	Optical-optical efficiency of single pulse /%	Optical-optical efficiency of steady state /%
220	7.3	161	4.56	43.6	55.9
370	12.3	147	4.95	46.9	58.9
520	17.3	137	5.23	48.7	61.0
670	22.3	130	5.45	50.1	62.7
820	27.3	124	5.63	51.2	64.1
970	32.3	120	5.79	52.0	65.4
1120	37.3	116	5.94	52.7	66.5

为分析抽运功率对光-光效率的影响,在注入功率 370 W 和抽运脉宽 500 μs 的条件下,模拟计算了不同抽运功率下瞬时输出功率随时间的变化曲线,如图 5 所示。抽运光强越大,功率上升时间越短,越早进入稳态提取阶段,不同抽运功率下的功率上升时间如表 2 所示。随着抽运功率提高,稳态光-光效

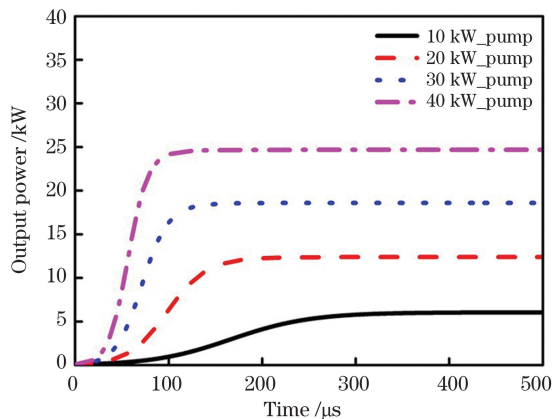


图 5 不同抽运功率下瞬时输出功率曲线

Fig. 5 Instantaneous output power curves under different pump powers

表 2 不同抽运光强下的输出结果

Table 2 Output results under different pump laser intensities

Pump power / kW	Pump intensity / ($\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Time from 0 to 90% of steady state power / μs	Output energy / J	Optical-optical efficiency of single pulse / %	Optical-optical efficiency of steady state / %
10.2	20	262	1.99	35.5	55.6
20.4	40	147	4.96	46.8	59.5
30.6	60	104	7.96	50.8	59.6
40.8	80	81	10.93	52.6	59.6

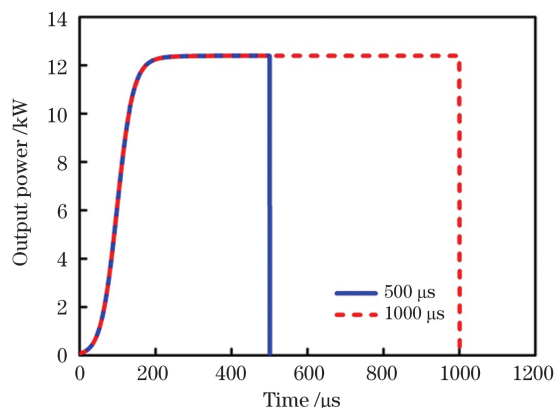


图 6 不同脉宽下瞬时输出功率曲线

Fig. 6 Instantaneous output power curves under different pulse widths

3 实验结果及分析

为验证以上的理论结果,选用种子光注入功率

率增大到一定程度后保持稳定,而由于功率上升时间缩短,单脉冲效率在不断提高,并存在继续提高的趋势。在抽运功率 40.8 kW 和注入功率 370 W 时,即注入光强 $12.3 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和抽运光强 $80 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,理论输出单脉冲能量 10.93 J,单脉冲光-光效率 52.6%。

为分析抽运脉宽对光-光效率的影响,模拟计算种子光注入功率 370 W 和抽运峰值功率 20.4 kW 时,对比 500 μs 脉宽和 1 ms 脉宽的瞬时输出功率随时间的变化情况。仿真结果如图 6 所示,500 μs 脉宽和 1 ms 脉宽在前 500 μs 内瞬时输出响应完全一致,说明抽运脉宽不影响功率上升时间,抽运光强和注入光强决定功率上升时间。理论计算得到 500 μs 脉宽时输出能量为 4.96 J,单脉冲光-光效率为 46.8%。1 ms 脉宽时输出能量为 11.16 J,单脉冲光-光效率为 52.9%。抽运脉宽越宽,功率提升时间在整个脉宽中所占的比例越小,单脉冲光-光效率越接近稳态光-光效率。相反,抽运脉宽越窄,单脉冲光-光效率将越低。

370 W、抽运峰值功率 20.4 kW、抽运脉宽 500 μs 和重复频率 50 Hz 条件进行实验。首先测试了重复频率 50 Hz 时激光放大器的输出性能。种子光为连续激光,放大器抽运源以准连续方式工作。在放大器不加载抽运时,进入增益介质的种子光功率为 370 W,透过平面波导的种子光功率为 8 W。在抽运重复频率 50 Hz、抽运脉宽 500 μs 下测试输出能量。前端 5.1 J 抽运时输出能量 1.68 J,后端 5.1 J 抽运时输出能量 1.72 J。测量双端抽运时的输出曲线,如图 7 所示,双端抽运最大能量 10.2 J 时输出能量为 4.67 J,光-光转换效率达 44.0%,实验测试结果与前面的理论计算结果基本吻合。从曲线可以看到,光-光转换效率随抽运能量增大而增大,说明放大器自身对放大自发辐射(ASE)有良好的抑制作用。并且,如果继续增大抽运能量,输出能量和光-光效率可以继续提高。

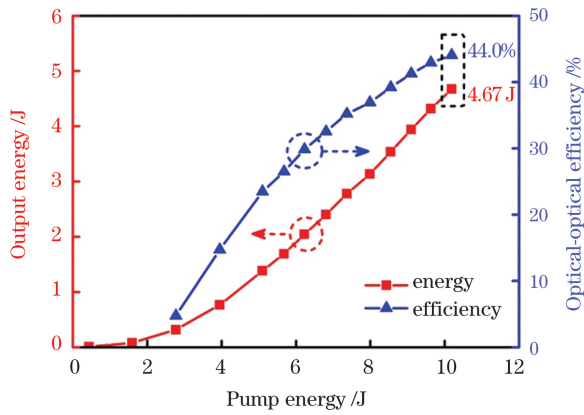


图 7 双端抽运下输出能量和光-光转换效率随抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Curves of output energy and optical-optical conversion efficiency with pump power under double-ended pumping

测试不同脉冲重复频率下的输出能量,重复频率 250 Hz 下输出单脉冲能量 4.60 J,重复频率 400 Hz 下输出单脉冲能量 4.65 J。可见,单脉冲能量不受脉冲重复频率影响,继续提高重复频率可以线性提高输出平均功率。

利用光束质量分析仪,测量不同脉冲重复频率下的光束质量 M^2 ,测试结果分别如图 8~10 所示。可见,在 X 方向上基本稳定, M_x^2 约为 3.3。随重复频率增大,光束质量在 Y 方向上变差, M_y^2 由 50 Hz 时的 3.38 退化到 400 Hz 时的 13.03。说明输出平均功率增大后,由于平面波导结构在 Y 方向尺寸

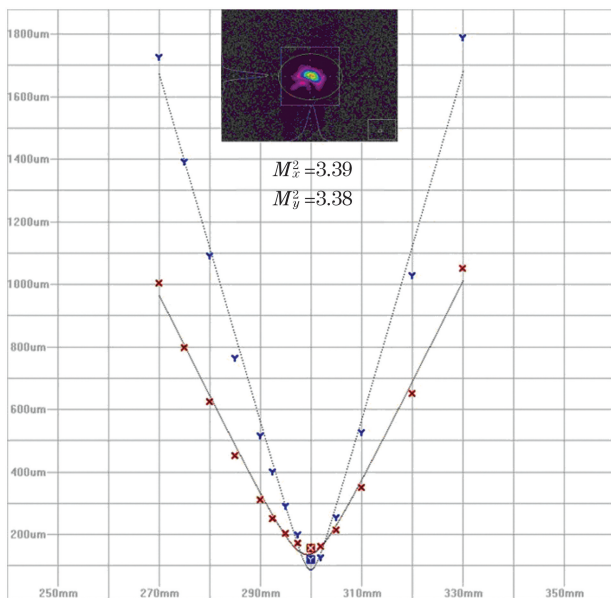


图 8 重复频率 50 Hz 时的光束质量

Fig. 8 Beam quality at pulse repetition frequency of 50 Hz

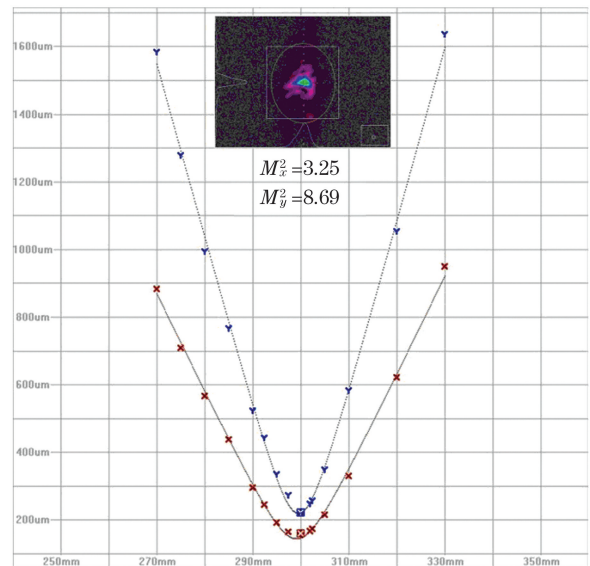


图 9 重复频率 250 Hz 时的光束质量

Fig. 9 Beam quality at pulse repetition frequency of 250 Hz

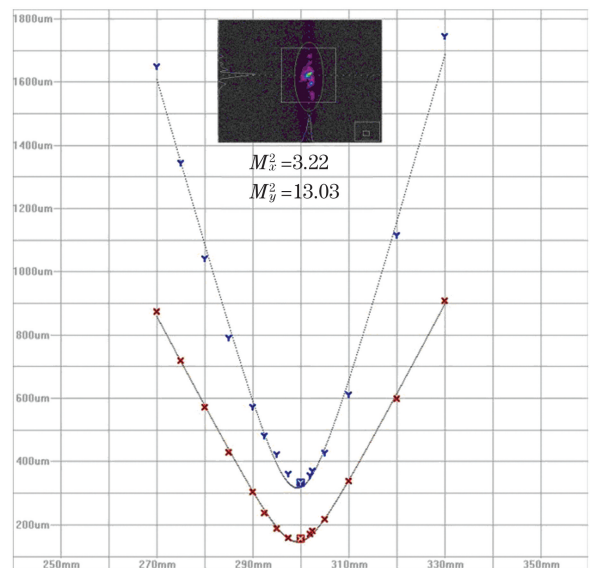


图 10 重复频率 400 Hz 时的光束质量测试

Fig. 10 Beam quality at pulse repetition frequency of 400 Hz

大,材料内部 Y 方向热致畸变增大。下一步,需要优化散热冷却均匀性和抽运均匀性,减小材料热畸变,以实现高光束质量高平均功率激光输出。

图 11 为光谱分析仪测得的光纤种子光和放大输出激光的光谱图。由图 11 可知,种子光的中心波长为 1029.86 nm,3 dB 线宽为 0.11 nm;在最大抽运功率下,放大输出激光的中心波长为 1029.86 nm,3 dB 线宽为 0.08 nm。放大输出激光与种子光中心波长一致,线宽有轻微压缩。

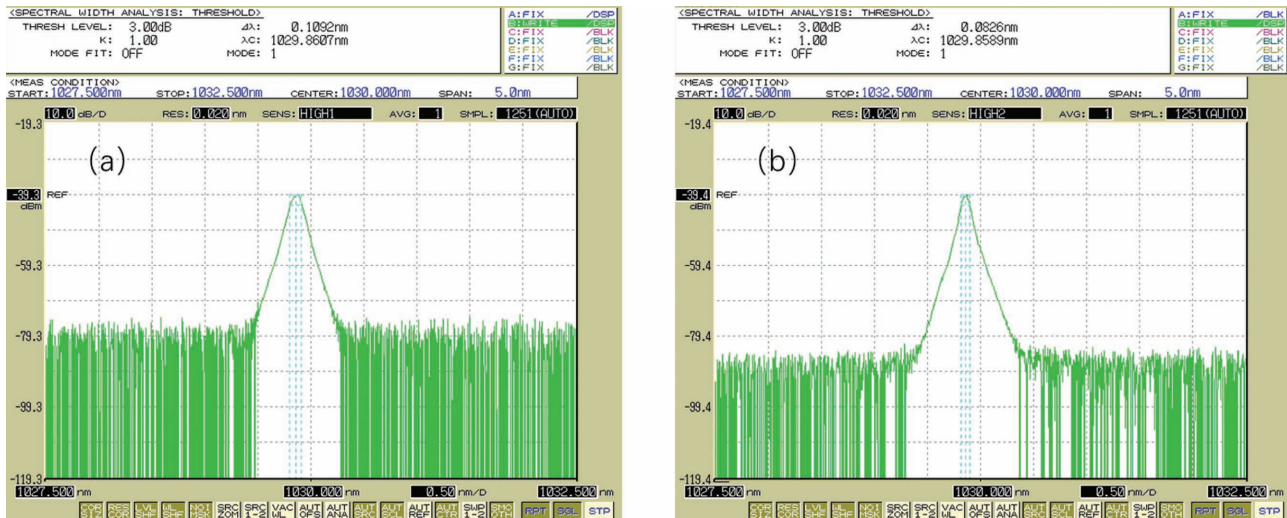


图 11 光谱图。(a)种子光;(b)放大激光

Fig.11 Spectrum. (a) Seed laser; (b) amplified laser

4 结 论

基于 Yb:YAG 平面波导激光放大器,研究了不同种子光注入光强、不同抽运光强和不同脉宽对光-光效率的影响。搭建了双端抽运平面波导 Yb:YAG 激光放大器,在重复频率 400 Hz,脉宽 500 μ s,抽运单脉冲能量 10.2 J 条件下,获得了最大单脉冲能量 4.65 J 的准连续激光放大输出,光-光转换效率为 44.0%,与理论模型基本吻合。继续增大注入种子光光强或者抽运光光强都将提升激光放大器的光-光转换效率。

参 考 文 献

- [1] Wang M Z, Duan W T, Cao D X, et al. Laser diode pumped cryogenically cooled Yb:YAG laser design for rep-rated and high-energy output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(1): 36-40.
王明哲, 段文涛, 曹丁象, 等. 激光二极管泵浦的重复频率大能量低温 Yb:YAG 激光器设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(1): 36-40.
- [2] Dai Q, Cui J F, Mao Y M, et al. Passively Q-switched narrow-pulse high-energy all solid-state lasers pumped by LD pulse[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2066-2069.
岱钦, 崔建丰, 毛有明, 等. LD 脉冲泵浦被动调 Q 窄脉冲大能量全固态激光器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2066-2069.
- [3] Jin Q W, Pang Y, Jiang J F, et al. High beam quality and high power short-pulse laser with 400 Hz[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(4): 10-13.
靳全伟, 庞毓, 蒋建锋, 等. 400 Hz 高光束质量高功率短脉冲激光器[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(4): 10-13.
- [4] Zhang W Q, Liu Y, Chen N J, et al. Laser diode double-pass double-end pumped Yb:YAG slab laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1101007.
张伟桥, 刘洋, 陈念江, 等. 激光二极管双端双程抽运 Yb:YAG 板条激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1101007.
- [5] Liu X S, Yang S, Si H Y, et al. High beam quality water-free pulsed Nd:YAG laser with output energy 1 J[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(12): 1523-1530.
刘学胜, 杨松, 司汉英, 等. 1 J 高光束质量免水冷脉冲 Nd:YAG 激光器[J]. 发光学报, 2019, 40(12): 1523-1530.
- [6] Liu J, Wang J T, Zhou T J, et al. Analysis and developments of high-power planar waveguide lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(6): 85-91.
刘娇, 王君涛, 周唐建, 等. 高功率平面波导激光器研究进展及分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 85-91.
- [7] Wang J T, Wang D, Su H, et al. Influence factors on efficiency of Nd:YAG planar waveguide laser amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1201005.
王君涛, 汪丹, 苏华, 等. Nd:YAG 平面波导激光放大器效率的影响因素[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1201005.
- [8] Thomson I J, Baker H J, Włodarczyk K, et al. 400 W Yb:YAG planar waveguide laser using novel unstable resonators[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7578: 75780K.

- [9] Wang J, Xu L, Chen Y, et al. 944 mJ Nd:YAG planar waveguide laser amplifier with the optical to optical efficiency of 52% [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22661-22669.
- [10] Wang J T, Wu Z H, Su H, et al. 15 kW efficient CW Nd:YAG planar waveguide MOPA laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3149-3152.
- [11] Chen Y J, Jiang H, Wang J T, et al. Planar waveguide oscillator with high output power and high efficiency [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0401001.
陈月健, 姜豪, 王君涛, 等. 高功率高效率平面波导激光振荡器实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0401001.

Long Pulse Laser Amplification of Yb:YAG Planar Waveguide with High Energy

Liu Dongsheng^{1,2,3}, Wang Jinchuan^{1,2,3}, Xu Liu^{1,2}, Du Jialin^{1,2},
He Ping^{1,2}, Tan Liang^{1,2}, Wang Yanan^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Wang Juntao^{1,2*},
Zhou Tangjian^{1,2}, Shang Jianli^{1,2}, Gao Qingsong^{1,2}

¹*Institute of Applied Electronics China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;*

²*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;*

³*Graduate School China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*

Abstract

Objective Diode-pumped solid-state laser(DPSSL)has a large energy compact structure, high efficiency, and good stability, which possesses outstanding application value and prospects in scientific research, military, industrial processing, and other fields. DPSSL has achieved rapid development in the past 10 years. The efficiency of high average-power solid-state laser has been the development direction of solid-state lasers. The planar waveguide gain medium can satisfy the high injected laser and high pump laser intensities. Thus, the planar waveguide laser is one of the potential laser technologies for obtaining high optical-optical efficiency and high average-power output. In this study, a quasi-continuous long pulse width Yb:YAG planar waveguide laser amplifier at room temperature with a wavelength of 1030 nm was constructed and the factors affecting the optical-optical conversion efficiency were analyzed. We hope that this study will help improve the optical-optical conversion efficiency of high-power solid-state lasers.

Methods The experiment is based on a planar waveguide gain medium. First, the theoretical model of laser dynamics based on Yb:YAG was developed. The effects of the injected laser intensity, pump laser intensity, and pump pulse width on the optical-optical conversion efficiency were analyzed through computer simulation. Then, a quasi-continuous long pulse width Yb:YAG planar waveguide laser amplifier at room temperature with a wavelength of 1030 nm was constructed. Next, the output energy of the amplifier was tested to verify the correctness of the theoretical model. The laser amplifier was operated at different pulse repetition frequencies. In addition, the beam quality of the output laser was measured using a beam quality analyzer, and spectra of the output laser were analyzed using a spectrograph.

Results and Discussions The simulation results show that the higher the seed laser power, the earlier it enters the steady-state extraction. The higher the injected laser intensity, the higher the optical efficiency of the steady-state and optical-optical efficiency of the pulse. However, the increase in steady-state optical-optical efficiency decreases gradually (Table 1). With an increase in pump power, the steady-state optical-optical efficiency increases and remains stable. Due to the shortening of power rise time, the optical-optical efficiency of the single pulse increases (Table 2). The output power of the pulse width of 500 μ s and output power pulse width of 1 ms are identical in the first 500 μ s, indicating that the pump pulse width does not affect the time to reach a steady-state (Fig. 6). The time to reach a steady-state is decided by the pump and injection intensities. The pump pulse width is longer, proportion of the time to reach a steady-state in the entire pulse width is smaller, and pulse optical-optical

efficiency approaches the steady-state optical-optical efficiency. The theoretical calculation results show that the output energy is 4.96 J and optical efficiency of monopulse is 46.8%, when pulse width is 500 μ s. The experimental result shows that the output energy is 4.67 J and optical-optical efficiency is 44.0% (Fig. 7), which is consistent with the theoretical calculation result. The single pulse energy of the laser is not affected by pulse repetition frequency. Thus, the average output power can be linearly increased by increasing the repetition frequency. With the average output power increasing, the beam quality of the output laser gets worse in the Y direction (Figs. 8–10). The amplified output laser has the same central wavelength as the seed laser, but the linewidth is slightly compressed (Fig. 11).

Conclusions In this study, a quasi-continuous long pulse width Yb:YAG planar waveguide laser amplifier at room temperature with a wavelength of 1030 nm is constructed. The effects of injected laser intensity, pump laser intensity, and pump pulse width on the optical-optical conversion efficiency are analyzed. The master oscillator power amplifier is adopted, and the seeder is maintained at a polarization of 1030 nm fiber laser. The gain medium of the amplifier is a Yb:YAG planar waveguide, and the pump sources are two quasi-continuous 940 nm laser diode arrays. After shaping, the pump light is coupled into the planar waveguide from the two end facets. With dual end pumping, we obtain the laser amplification output with a maximum energy of 4.65 J when the pump repetition frequency is 400 Hz, and the maximum peak pump power is 20.4 kW. The polarization degree is 97%, and the optical-optical conversion efficiency is 44.0%, which is consistent with the theoretical calculation.

Key words lasers; laser amplifier; 1030 nm; planar waveguide; Yb:YAG

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.4480