

## 高功率平面波导皮秒激光放大器

王金川<sup>1,2,3</sup>, 何平<sup>1,2\*</sup>, 曹海霞<sup>1,2</sup>, 汪丹<sup>1,2</sup>, 王君涛<sup>1,2</sup>, 周唐建<sup>1,2</sup>, 尚建力<sup>1,2</sup>, 高清松<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 612900;<sup>2</sup>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;<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

**摘要** 设计了一种 Nd:YAG 平面波导皮秒激光放大器。光纤激光器提供重复频率可调的皮秒种子源, Nd:YAG 平面波导激光放大器采用后端抽运方式, 其抽运源工作模式为连续模式。当种子光的重复频率为 24.46 MHz、脉宽为 11.7 ps、注入功率为 0.48 W 时, 输出功率为 228 W, 单脉冲能量为 9.3  $\mu$ J, 光-光转换效率达到 20.2%, 导波方向和非导波方向的光束质量( $M^2$ )分别为 1.4 和 4.6。当种子光的重复频率降低至 25 kHz 时, 输出平均功率为 24.2 W, 单脉冲能量提升至 0.97 mJ, 单脉冲能量放大倍率为  $4.9 \times 10^4$ , 表明放大系统具有较强的放大能力。根据理论计算, 分析了进一步提高光-光转换效率和输出功率、抑制放大自发辐射(ASE)的方法。

**关键词** 激光器; 皮秒激光; 平面波导; 高峰值功率

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220649

## 1 引言

皮秒激光在工业加工<sup>[1-4]</sup>和科学研究<sup>[5-8]</sup>等领域有着广泛而重要的应用。目前, 国内的低功率皮秒激光器主要为光纤激光器, 其优点是光束质量好、脉冲宽度窄、结构紧凑, 但受限于光纤材料中的低光学损伤阈值和非线性效应, 难以实现大能量、高峰值功率的输出。固体激光放大器因其能够承受高峰值功率的优点, 可以实现高功率、大能量的激光输出, 在皮秒脉冲激光领域具有巨大的应用价值, 最近几年取得了重大研究进展。2015 年, 陆云峰等<sup>[9]</sup>报道了一种面向高峰值功率的光纤-固体混合放大系统, 光纤种子源输出重复频率为 120 kHz、中心波长为 1064 nm、脉宽为 220 ps 和平均功率为 21 mW 的种子光, 经过四级棒状固体激光放大器的放大之后, 得到平均功率为 39.2 W、峰值功率为 1.5 MW 的输出, 光束质量因子  $M^2=1.33$ 。2018 年, 赵明等<sup>[10]</sup>以光纤脉冲振荡器为种子源, 采用三通 Nd:YAG 棒状晶体放大器将能量提升至 mJ 级。当放大器工作在 1、10、100 kHz 重复频率下时, 分别得到 2.34、4.30、10.30 W 功率输出, 对应的单脉冲能量分别为 2.34、0.43、0.1 mJ, 光束质量因子  $M^2 < 1.3$ 。2019 年, 董彬等<sup>[11]</sup>采用 zig-zag 板条对皮秒脉冲激光进行放大, 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。种子光的平均功率为 4 W, 重复频率为 100 kHz, 脉宽为 9.6 ps, 四通放大之后的输出激

光功率为 103 W, 单脉冲能量达到 1.03 mJ。2021 年, 董雪岩等<sup>[12]</sup>设计了一种光纤-固体混合皮秒放大器, 固体放大器增益介质采用基于 Nd:YAG 材料的 InnoSlab 构型。种子源输出平均功率为 4.5 W 的种子光进入到 InnoSlab 放大器中进行放大, 在抽运功率为 117 W 时, 经 8 程放大后获得了平均功率为 28.4 W、脉宽为 10.6 ps、重复频率为 18.9 MHz 的皮秒激光放大输出,  $x$  和  $y$  方向的光束质量因子分别为  $M_x^2=1.33$  和  $M_y^2=1.27$ 。

平面波导具有特殊的结构, 融合了板条激光器和光纤激光器的优点, 具有板条激光器输出高的特点, 同时也具有光纤激光器能量转换高的特点<sup>[13]</sup>。平面波导的芯层增益区厚度很薄, 在相同的抽运功率下, 抽运功率密度比棒状和板条等固体增益介质高 1~2 个量级, 可以实现高效率的激光输出。2008 年, 清华大学报道了高效率的平面波导激光器, 采用几何尺寸为 12 mm $\times$ 5 mm $\times$ 1 mm、芯层厚度为 0.4 mm 的平面波导作为增益介质, 获得了 2.9 W 的激光输出, 光-光转换效率高达 58%<sup>[14]</sup>。2016 年, Wang 等<sup>[15]</sup>报道了一种基于 Nd:YAG 平面波导的准连续激光放大器, 采用 Nd:YAG 棒状振荡器作为种子源, 振荡器注入单脉冲能量为 182 mJ、重复频率为 100 Hz、脉宽为 192  $\mu$ s 的种子光, 经过平面波导放大器的放大之后, 获得了单脉冲能量为 944 mJ 的输出光, 光-光转换效率达 52%。2017 年, Wang 等<sup>[16]</sup>报道了一种端面抽运的 Nd:YAG 平面波导主控振荡器功率放大器结构, 最高输出功率

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-11; 录用日期: 2022-05-07; 网络首发日期: 2022-05-17

基金项目: 中物院创新发展基金(C-2021-CX20210030)

通信作者: \*peack@163.com

达到 1.5 kW,  $x$  和  $y$  方向的光束质量分别为  $M_x^2=2.79$  和  $M_y^2=7.01$ 。同年,陈月健等<sup>[17]</sup>采用几何尺寸为  $1\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 60\text{ mm}$  的双包层结构平面波导作为增益介质,搭建了平-平腔实验装置,从而获得了平均功率为 441 W、最大单脉冲能量为 928 mJ 的激光输出,光-光转换效率达到 53.2%,中心波长为 1064 nm。

本文采用 Nd:YAG 平面波导作为增益介质,设计了后端抽运的皮秒激光放大器。脉宽为 11.7 ps,重复频率可调,放大器的抽运源工作在连续模式。种子源的重复频率最高为 24.46 MHz,此时注入功率为 0.48 W,输出功率为 228 W,单脉冲能量为 9.5  $\mu\text{J}$ ,光-光转换效率为 20.2%,导波方向和非导波方向的光束质量  $M^2$  分别为 1.4 和 4.6。当种子源的重复频率为最低的 25 kHz、注入功率为 0.49 mW 时,输出功率为 24.2 W,峰值功率为 82.9 MW,单脉冲能量为 0.97 mJ,单脉冲能量的放大倍率为  $4.9\times 10^4$ ,表明放大系统具有较强的放大能力。

## 2 实验装置及理论分析

如图 1 所示,平面波导结构是介于板条与光纤

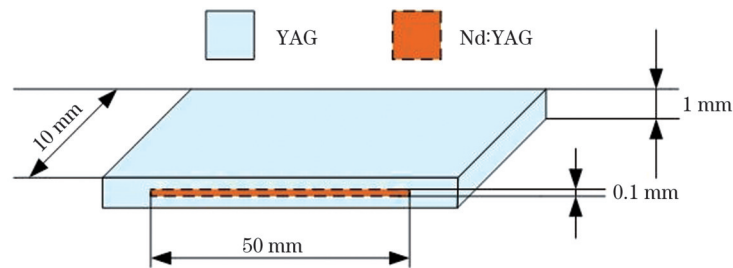


图 1 平面波导结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of planar waveguide

1064 nm 光纤-平面波导皮秒激光器实验装置如图 2 所示,它由种子源、隔离器、种子光扩束整形系统、Nd:YAG 平面波导、后端抽运源和抽运耦合系统组

之间的一种激光增益介质结构,主要由非掺杂的纯 YAG 包层和掺杂的 Nd:YAG 芯层构成,它在长度和宽度上为常规尺度,但芯层的厚度很薄,通常在几十微米到几百微米之间。由平面波导热力分析模型<sup>[18]</sup>可知,当波导整体厚度一定时,波导芯层厚度越小,内包层可承受的最大应力越大,最大容许的热负载越大,可承受的抽运功率也越大。考虑到波导方向的模式控制和芯层的加工难度,实验采用的平面波导结构尺寸为  $1\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 60\text{ mm}$  (厚 $\times$ 宽 $\times$ 长)。其中,芯层的尺寸为  $0.1\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 50\text{ mm}$  (厚 $\times$ 宽 $\times$ 长),芯层 Nd:YAG 的原子数分数为 1.1%,在芯层大面键合两个  $0.45\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 50\text{ mm}$  (厚 $\times$ 宽 $\times$ 长)非掺杂纯 YAG 作为包层,两端各有一个 5 mm 长的纯 YAG 端帽。大面与铜微通道热沉之间采用焊接方式,以确保冷却水能够对增益介质进行有效冷却,实验采用的冷却水温为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。同时,在两端进行了切角处理,使波导的两个端面不平行,以避免放大过程中形成的荧光在主光路形成寄生振荡。

成。种子源采用 1064 nm 皮秒光纤激光器,中心波长为 1064.46 nm,重复频率可调,最高为 24.46 MHz,最低为 25 kHz,种子光的脉宽曲线图如图 3 所示。

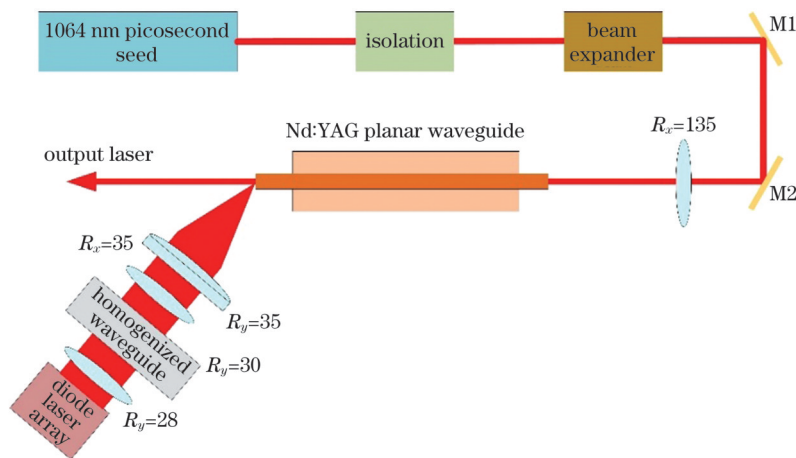


图 2 1064 nm 光纤-平面波导皮秒激光器示意图

Fig. 2 Schematic of 1064 nm fiber-planar waveguide picosecond laser

种子光经过隔离整形系统之后,通过透镜水平方向 ( $x$  方向) 曲率半径为  $R_x=135\text{ mm}$  的柱透镜会

聚,之后耦合进入波导芯层。最高重复频率下种子光注入波导芯层的功率为 0.48 W,种子光透过平面

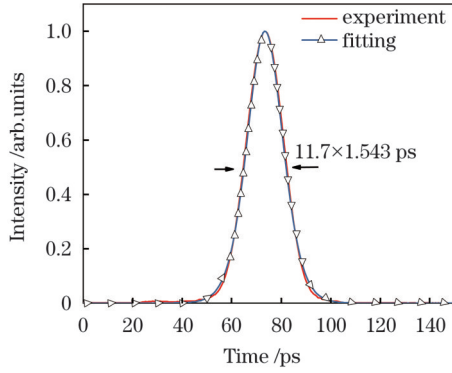


图3 种子光的脉宽曲线

Fig. 3 Pulse-width curves of seed laser

波导芯层后的光束质量因子为  $M^2=1.3$ 。抽运源为 20 个巴条空间叠加的激光二极管阵列,中心波长为 808 nm。抽运耦合系统包含四个曲率半径分别为  $R_y=28\text{ mm}$ 、 $R_y=30\text{ mm}$ 、 $R_y=35\text{ mm}$  和  $R_x=35\text{ mm}$  的柱透镜以及匀化波导,其中  $R_y$  为透镜竖直方向( $y$  方向)的曲率半径。抽运光通过  $R_y=28\text{ mm}$  的柱透镜会聚进入匀化波导,实现  $y$  方向抽运光的均匀化,随后通过一对曲率半径分别为  $R_y=30\text{ mm}$  和  $R_y=35\text{ mm}$  的柱透镜进行  $y$  方向的扩束,实现抽运光与波导芯层端面的匹配,再通过  $R_x=35\text{ mm}$  的柱透镜会聚进入平面波导芯层。

对于后端抽运系统,波导增益区  $x$  方向各点的抽运吸收光强为

$$I(x) = I_p \exp[-\alpha_e(L-x)], \quad (1)$$

式中:  $I_p$  为抽运总光强;  $\alpha_e$  为等效吸收系数;  $L$  为增益区长度;  $x$  为长度方向的位置变量。

增益区内的小信号增益系数可表示为

$$g_0 = \frac{\eta_Q \eta_S \eta_B P_{ab}}{I_s V}, \quad (2)$$

式中:  $\eta_Q$  为量子效率;  $\eta_S$  为斯托克斯因子;  $\eta_B$  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。

对于单程激光放大器,增益区内每点的功率密度可以表示为

$$\frac{dI(x)}{dx} = \frac{g_0 I(x)}{1 + I(x)/I_s} - \gamma I(x), \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为损耗系数。

将增益区分为若干等分,计算每个区域的吸收功率,再根据式(1)、(2)计算增益区内各个点的抽运功率吸收密度。在电流达到最大值 100 A 时,去除端面反射以及透射损耗,进入波导增益区的抽运功率为 1130 W。此时芯层内不同位置处的抽运吸收功率密度分布曲线如图 4 所示,靠近泵浦源的一端的抽运吸收功率较高,最高为  $39.8\text{ kW}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,远离泵浦源的一端的抽运功率密度较低,最低为  $5.4\text{ kW}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

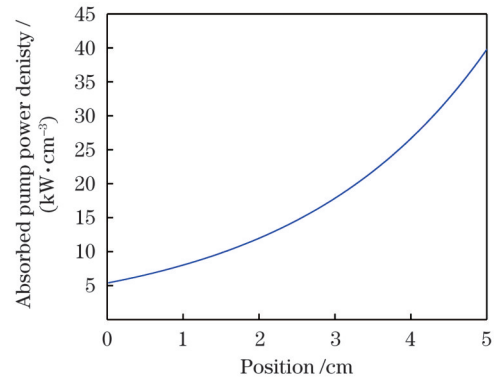


图4 增益区内不同位置处的抽运吸收功率密度

Fig. 4 Absorbed pump power densities at different positions in gain zone

对于重复频率为 24.46 MHz 的种子光,在抽运光功率为 1130 W、种子光注入功率为 0.48 W 的条件下,结合式(1)、(2)和(3),通过 Matlab 软件进行模拟计算,得到增益区内不同位置处的输出功率曲线,如图 5 所示。根据理论计算结果,在最高重复频率下,放大器的理论输出功率可达 264.4 W,光-光转换效率为 23.6%。

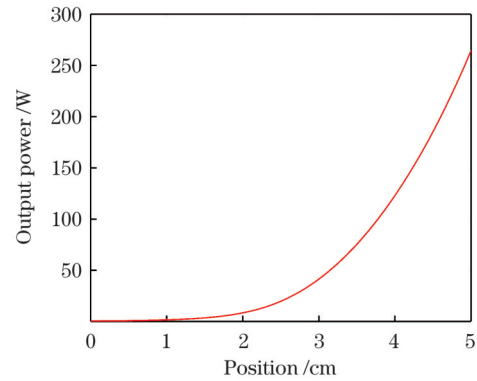


图5 增益区内不同位置处的输出功率

Fig. 5 Output powers at different positions in gain zone

### 3 实验结果与分析

在加载抽运电流的条件下,当种子光重复频率为 24.46 MHz、注入功率为 0.48 W 时,皮秒激光放大的功率曲线如图 6 所示。当加载电流达到 100 A 时,实际抽运功率为 1130 W,输出功率为 228 W,光-光转换效率为 20.2%。输出功率测量值与理论计算数据接近,差距主要来自放大过程中产生的放大自发辐射(ASE)。种子光注入光强仅为  $48\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,远小于 Nd:YAG 材料自身的饱和光强(即饱和功率密度)  $I_s=2890\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,大部分增益区域处于非饱和增益状态,提取效率很低,未被及时消耗的激活粒子不能被及时消耗而向下能级跃迁并得到放大,形成放大自发辐射现象,导致实际输出与理论计算出现一定偏差。对平均功率为 228 W 的输出进行光束质量测试,导波方向( $y$  方向)和非导波方向( $x$  方向)的光束质量分别为 1.4 和 4.6,如图 7 所示。激光放大过程中平面波导内部的热致畸变使得非



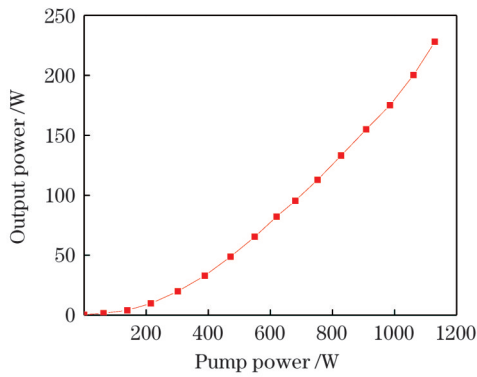


图 6 输出功率与抽运功率的关系曲线  
Fig. 6 Output power versus pump power

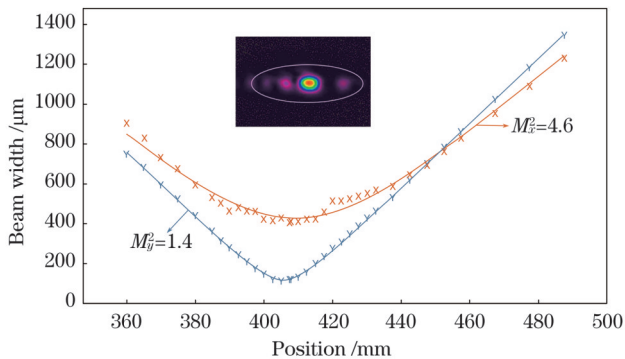


图 7 平均输出功率为 228 W 时的输出光束质量  
Fig. 7 Output beam quality with average output power of 228 W

导波方向出现了高阶像差,导致该方向的光束质量因子较高,下一步需要优化冷却均匀性和抽运均匀性,降低平面波导内部的热致畸变,提高非导波方向的光束质量,以实现高功率、高效率、高光束质量的放大激光输出。

为了测试系统的放大能力,在种子光单脉冲能量固定为 19.8 nJ 的条件下,降低种子光的重复频率并进行放大,输出功率与抽运功率的关系曲线如

表 1 不同种子光重复频率下的输出结果  
Table 1 Output results under different seed laser repetition frequencies

Repetition frequency /kHz	Input power / mW	Input single-pulse energy /nJ	Output single-pulse energy /μJ	Optical-optical conversion efficiency /%	Magnification factor
$2.446 \times 10^4$	480	19.8	9.3	20.2	475
$4.89 \times 10^3$	96	19.8	32.7	14.1	$1.7 \times 10^3$
$2.038 \times 10^3$	40	19.8	64.1	11.6	$3.3 \times 10^3$
$1.019 \times 10^3$	20	19.8	106.2	9.6	$5.4 \times 10^3$
500	9.8	19.8	165	7.3	$1.1 \times 10^4$
200	3.9	19.8	292.5	5.2	$1.5 \times 10^4$
99.4	2	19.8	430.6	3.8	$2.2 \times 10^4$
49.8	0.97	19.8	634.5	2.3	$3.2 \times 10^4$
25	0.49	19.8	968	2.2	$4.9 \times 10^4$

图 8 所示,输出性能参数随重复频率的变化规律如表 1 所示。随着重复频率的降低,种子光注入光强减小,增益介质内部处于非饱和增益状态的区域加长,输出光功率和光-光转换效率降低。当重复频率降低至 25 kHz 时,整个放大过程中增益区内的种子光光强都小于饱和光强,激光放大器始终处于小信号放大提取状态,放大效率极低,ASE 效应最为明显,大量的能量最终以荧光的形式被消耗掉。但随着种子光重复频率的降低,单脉冲抽运储能周期增加,输出单脉冲能量则有所提升。当种子光的重复频率为 49.8 kHz 时,输出单脉冲能量为 0.63 mJ;当种子光的重复频率降低至 25 kHz 时,输出激光峰值功率达到 82.9 MW,输出单脉冲能量提升至 0.97 mJ,此时的放大倍率为  $4.9 \times 10^4$ ,表明放大系统具有较强的放大能力。在接下来的工作中可通过两种方法来进一步提高系统的放大输出功率和抑制 ASE 效应:1) 提高种子光的注入功率;2) 通过在前端加上另一个抽运源的方式来增加增益区的抽运功率密度。

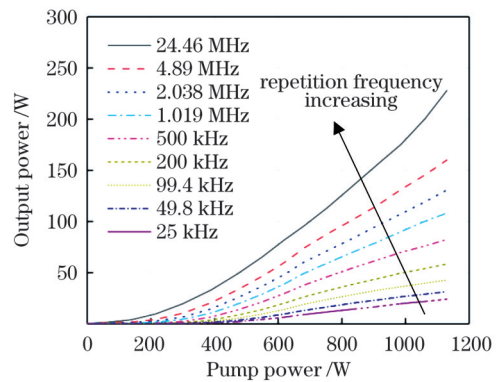


图 8 不同重复频率下种子光的输出功率  
Fig. 8 Output powers of seed lasers at different repetition frequencies

种子源注入功率太低是限制输出功率和效率的主要因素。在后端抽运功率为 1130 W、种子光重复频率为 24.46 MHz、脉宽不变的条件下,对种子光注入功率分别为 0.48、1.00、2.00、4.00、8.00 W 时的输出特性进行理论计算。如图 9(a)所示,当种子光注入功率为 0.48 W 时,种子光进入增益区 2.68 cm 处,达到 1 倍饱和光强,提取效率为 25%;在 4.06 cm 处种子光光强才达到 5 倍饱和光强,此时提取效率达到 41.1%,此后区域的提取效率曲线的变化不大,系统接近饱和增益状态。可见在 0.48 W 低注入功率时,整个芯层大部分增益区域处于非饱和增益状态,提取效率较低。

随着种子光注入功率的提高,处于饱和增益状态的增益区域明显加长,当种子光注入功率提升至 8 W 时,种子光进入增益区域 3.42 cm 处即达到 5 倍饱和光强,放大系统对抽运能量的利用效率提高,输出功率和光-光转换效率都得到了提升。观察图 9(b)、(c)所示曲线,随着种子光注入功率的提升,理论输出功率和光-光转换效率明显增加,当种子光注入功率为 8 W 时,输出功率提高到 330.3 W,光-光转换效率则提升至 29.3%。可见通过提高种子光的注入功率,系统能够实现更高功率和更高光-光转换效率的输出,进一步抑制 ASE 效应。

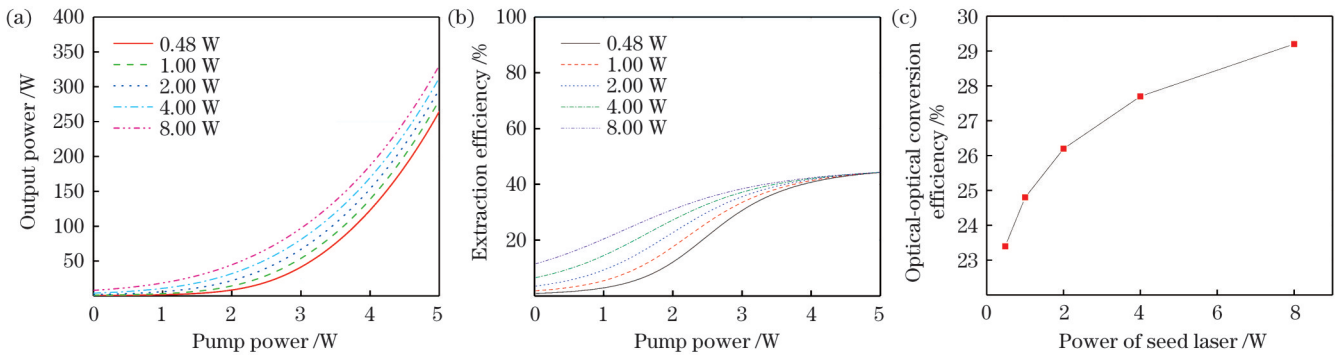


图 9 激光放大系统的输出特性曲线。(a)不同种子光注入功率下的理论输出功率曲线;(b)不同种子光注入功率下的理论提取效率曲线;(c)理论光-光转换效率与种子光功率的关系

Fig. 9 Output characteristic curves of laser amplifier system. (a) Theoretical output powers at different input seed powers; (b) theoretical extraction efficiencies at different input seed powers; (c) theoretical optical-optical conversion efficiency versus power of seed laser

通过在前端加上另一个抽运源的方式增加前端增益区域的抽运功率密度,这也是提高输出功率和光-光转换效率、进一步抑制 ASE 效应的方法。根据图 3 所示的理论计算,在后端抽运的条件下,增益区内前端区域的抽运吸收功率密度较低,导致该区域的种子光功率增速较为缓慢,整个前端增益区域都处于小信号放大状态。通过提高该区域的抽运功率密度,可以进一步提高输出功率和光-光转换效率。图 10(a)所示为注入种子光参数不变、对称双端总功率为 2260 W 时增益区内部的理论抽运功率密度曲线,前端区域的功率密

度大幅度提升,最高处达到  $45.2 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,在增益区中心处降低到最小值  $29.5 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。说明前后抽运源的抽运光进入增益区后不断被吸收,使基态原子发生跃迁,抽运功率密度随之降低。此外,双端抽运的抽运功率密度分布也更加均匀。此时的输出功率与位置的关系如图 10(b)所示,随着平面波导前端区域抽运吸收功率密度的增加,种子光进入增益区域 1.86 cm 之后即达到 5 倍饱和光强,增益区大部分都处于饱和增益状态,提取效率得到提升,至放大结束,理论输出功率达到 570.6 W,光-光转换效率为 25.2%。

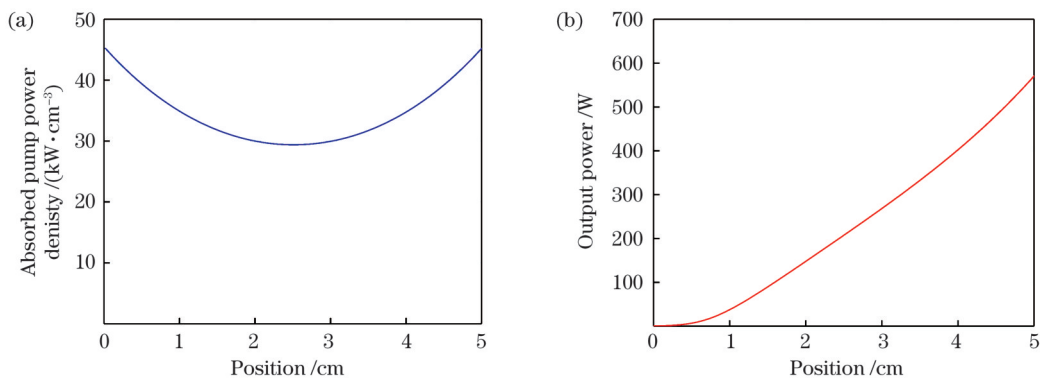


图 10 双端抽运下的理论输出特性。(a)抽运吸收功率与位置的关系曲线;(b)输出光功率与位置的关系曲线

Fig.10 Output characteristic curves under dual-end pump. (a) Absorbed pump power density versus position; (b) output power versus position

## 4 结 论

采用Nd:YAG平面波导作为增益介质,设计了后端抽运的皮秒激光放大器。种子光重复频率为24.46 MHz,脉宽为11.7 ps,注入功率为0.48 W,输出功率为228 W,光-光转换效率达到20.2%,导波方向和非导波方向的光束质量分别为1.4和4.6。在种子光单脉冲能量固定为19.8 nJ的条件下,改变种子光的重复频率并进行放大,当种子光的重复频率降低至25 kHz时,输出平均功率为24.2 W,单脉冲能量提升至0.97 mJ,此时的放大倍率为 $4.9 \times 10^4$ ,表明放大系统具有较强的放大能力。根据理论计算,简要分析了进一步提高输出功率、抑制ASE效应的方法。在接下来的工作中,应提高种子光的注入功率并优化抽运光耦合系统和增益介质冷却系统,以实现高功率、高效率、高光束质量的放大激光输出。

### 参 考 文 献

- [1] 李平雪, 辛承聪, 高健, 等. 皮秒激光加工研究进展与展望[J]. 激光与红外, 2018, 48(10): 1195-1203.  
Li P X, Xin C C, Gao J, et al. Research progress and development of picosecond laser processing[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(10): 1195-1203.
- [2] 季凌飞, 燕天阳, 姜锐, 等. 陶瓷齿轮皮秒激光高精加工研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111429.  
Ji L F, Yan T Y, Jiang R, et al. Picosecond laser precision processing of ceramic gear[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111429.
- [3] 彭伟, 雷辉. 能量密度对皮秒激光清洗H13模具钢的表面形貌与性能影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1714002.  
Peng W, Lei H. Effect of energy density on surface morphology and properties of H13 mold steel via picosecond laser cleaning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714002.
- [4] 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(2): 022009.  
Ye J J, Xie Z Y, Huang X G, et al. Application of picosecond laser processing to target fabrication in equation of state experiments[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(2): 022009.
- [5] 王鹏, 赵环, 王兆华, 等. 飞秒与皮秒激光脉冲的主动同步及和频产生宽带超短激光的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(8): 4161-4165.  
Wang P, Zhao H, Wang Z H, et al. Active synchronization of two independent femtosecond and picosecond lasers and sum frequency generation of two laser pulses[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 4161-4165.
- [6] 路桥, 毛庆和. 皮秒光纤激光脉冲两个关键问题的研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121005.  
Lu Q, Mao Q H. Two key frontier issues on picosecond pulses generated by mode-locked fiber lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121005.
- [7] 门琳琳, 龙明亮, 张海峰, 等. 多脉冲激光的微弱信号探测能力分析研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 557-562.  
Men L L, Long M L, Zhang H F, et al. Research on weak signal detection ability for burst-pulses laser[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 557-562.
- [8] 崔昊杨, 李志锋, 马法君, 等. 皮秒脉冲激光照射下碲镉汞光伏红外探测器的负光伏响应新现象[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 161-164.  
Cui H Y, Li Z F, Ma F J, et al. Negative photovoltaic-responses in HgCdTe infrared photovoltaic detectors irradiated with picosecond pulsed laser[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(3): 161-164.
- [9] 陆云峰, 王毅, 刘斌, 等. 1.5 MW 峰值功率光纤-固体混合放大 MOPA 激光系统[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202009.  
Lu Y F, Wang Y, Liu B, et al. 1.5 MW peak power, fiber-solid hybrid amplification MOPA lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0202009.
- [10] 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.  
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.
- [11] 董彬, 刘磊, 唐晓军, 等. 100 W 高功率 Nd:YAG 皮秒板条激光放大器[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1101004.  
Dong B, Liu L, Tang X J, et al. 100-W high-power Nd:YAG picosecond laser-slab amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1101004.
- [12] 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(17): 1701004.  
Dong X Y, Li P X, Li S, et al. High beam quality fiber-solid hybrid Innoslab picosecond amplifier with high repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1701004.
- [13] 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.  
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.
- [14] Kang H X, Zhang H, Yan P, et al. An end-pumped Nd:YAG planar waveguide laser with an optical to optical conversion efficiency of 58% [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(12): 879-881.
- [15] 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.
- [16] Wang J T, Wu Z H, Su H, et al. 1.5 kW efficient CW Nd:YAG planar waveguide MOPA laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3149-3152.
- [17] 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.  
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.
- [18] 王君涛, 王小军, 周唐建, 等. 端面抽运双包层 Nd:YAG 平面波导激光放大器设计[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102009.  
Wang J T, Wang X J, Zhou T J, et al. Design of end-pumped double cladding Nd:YAG planar waveguide laser amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102009.

# High-Power Planar Waveguide Picosecond Laser Amplifier

Wang Jinchuan<sup>1,2,3</sup>, He Ping<sup>1,2\*</sup>, Cao Haixia<sup>1,2</sup>, Wang Dan<sup>1,2</sup>, Wang Juntao<sup>1,2</sup>, Zhou Tangjian<sup>1,2</sup>,  
Shang Jianli<sup>1,2</sup>, Gao Qingsong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 612900, Sichuan, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 612900, Sichuan, China;*

<sup>3</sup>*Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*

## Abstract

**Objective** High-energy, high-peak power, picosecond pulse lasers have broad application prospects in laser science research and industrial processing. The configuration of a master oscillator power amplifier (MOPA) is commonly used to obtain a high output power. In this case, a low-power oscillator with the desired characteristics is used as the seeder, whose radiation is injected into an amplifier to scale the output power or pulse energy, while other properties remain mostly unchanged. The planar waveguide can provide high seed light injection powers and high pumping power densities. Therefore, the planar waveguide lasers are a potential laser technology for obtaining picosecond pulse laser with high energy and high peak power.

**Methods** A Nd:YAG planar waveguide picosecond laser amplifier is designed. The seed is a fiber picosecond laser, which is amplified by a compactness amplifier with a Nd:YAG planar waveguide as the gain medium to obtain a picosecond laser output. The small signal gain coefficient and power distributions at different positions within the planar waveguide are calculated using related theories. Finally, based on the results of theoretical calculations, a picosecond laser amplifier is designed and built, and the experiment is completed under different seed laser repetition frequencies.

**Results and Discussions** To evaluate the amplification ability of the amplification system under different seed laser repetition frequencies, the seed source is operated at repetition frequencies of 24.46 MHz, 4.89 MHz, 2.038 MHz, 1.019 MHz, 500 kHz, 200 kHz, 99.4 kHz, 49 kHz, and 25 kHz, and the output power is obtained as a function of the pump power (Fig. 7 and Table 1). Once the seed light passes through the isolator and the beam expansion system, the single pulse energy injected into the slab is 19.6 nJ. In the single-end pumped case, when the repetition frequency of the seed source is 24.46 MHz, the output power is 228 W, the single-pulse energy is 9.3  $\mu$ J, the optical-optical conversion efficiency is 20.2%, and the beam quality ( $M^2$ ) values in the guided and non-guided directions are 1.4 and 4.6, respectively. In order to measure the amplification system, we change the repetition frequency of the seed laser under the condition that the pulse width of the seed laser is 11.7 ps and the single pulse energy of the seed laser is fixed at 19.6 nJ. When the repetition frequency of the seed source is 49.8 kHz, a laser output power of 31.6 W is obtained with the single-pulse energy of 0.63 mJ. When the repetition frequency of the seed source is 25 kHz, a laser output power of 24.2 W is obtained with the single-pulse energy of 0.97 mJ and the peak power of 82.9 MW. The magnification factor is up to  $4.9 \times 10^4$ . Experimental results show that this amplifier can suppress the amplification of the spontaneous emission (ASE) effect and can effectively increase the magnification, thereby improving the output power and conversion efficiency. Moreover, the method of improving the output and suppressing the ASE is further analyzed based on the theoretical calculations. Experimental results reveal that the system has a strong amplification ability.

**Conclusions** In this study, a back end-pumped Nd:YAG planar waveguide picosecond laser amplifier is designed. The fiber laser provides a picosecond seed source with a tunable repetition frequency, and the pumping source operates in the continuous mode. Based on the results, when the seed light repetition frequency is 24.46 MHz, the pulse width is 11.7 ps, the injection power is 0.48 W, the output power is 228 W, the single-pulse energy is 9.3  $\mu$ J, and the optical-optical conversion efficiency reaches 20.2%. Moreover, the beam quality values in the guided and non-guided directions are 1.4 and 4.6, respectively. In contrast, when the repetition frequency of the seed laser is reduced to 25 kHz, the average output power is 24.2 W, the single-pulse energy is increased to 0.97 mJ, and the single-pulse energy magnification factor is  $4.9 \times 10^4$ , indicating that the amplification system has a strong amplifying ability. The methods to further improve the optical-optical conversion efficiency and suppress ASE are analyzed based on the theoretical calculations. To the best of our knowledge, this is the first report on a planar waveguide picosecond laser amplifier.

**Key words** lasers; picosecond laser; planar waveguide; high peak power