

## 百瓦级 1 030 nm 光纤-固体混合放大激光器

徐 岩<sup>1,2</sup>, 彭志刚<sup>1,2\*</sup>, 石宇航<sup>1,2</sup>, 王贝贝<sup>1,2</sup>, 程昭晨<sup>1,2</sup>, 王 璞<sup>1,2</sup>

- (1. 北京工业大学 材料与制造学部 激光工程研究院, 北京 100124;
2. 北京工业大学 北京激光应用技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:** 光纤-固体混合放大技术能够将光纤激光器和固体放大器的优势结合, 获得结构紧凑、成本低廉的高功率超短脉冲激光。因此, 实验设计了基于掺镱光纤-固体混合放大技术的高平均功率超短脉冲激光器。该激光器主要由全光纤结构激光器和两级固体放大器组成, 第一级为基于 Yb: YAG 单晶光纤的固体放大器, 第二级为基于无侧面抛光的棒状 Yb: YAG 晶体的主放大器。超短脉冲全光纤前端平均输出功率为 6.5 W, 重复频率 52.9 MHz, 脉冲宽度 47.5 ps。第一级单晶光纤放大器采用单通放大形式, 在反向泵浦功率 182 W 时获得 40 W 的平均功率。第二级固体放大器同样为单通放大, 在反向泵浦功率 307 W 时获得平均功率 122.9 W 的超短脉冲激光输出, 滤除热退偏激光后获得了 107.3 W 的线偏振超短脉冲激光, 对应斜效率为 26.1%。此时测得脉冲宽度为 12.1 ps, 中心波长为 1 030.6 nm, 光谱宽度为 2.4 nm。在最大输出功率 107.3 W 时, 测得水平和垂直方向的光束质量因子  $M_x^2=1.45, M_y^2=1.20$ 。  
**关键词:** 激光放大器; 超短脉冲; 混合放大

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210442

## Hundred-watt-level 1 030 nm fiber-bulk hybrid amplified laser

Xu Yan<sup>1,2</sup>, Peng Zhigang<sup>1,2\*</sup>, Shi Yuhang<sup>1,2</sup>, Wang Beibei<sup>1,2</sup>, Cheng Zhaochen<sup>1,2</sup>, Wang Pu<sup>1,2</sup>

- (1. Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Engineering Research Center of Laser Applied Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Fiber-bulk hybrid amplification technology combines the advantages of fiber lasers and bulk amplifiers to obtain a compact and low-cost high power ultrashort pulse laser. Therefore, a high average power ultrashort pulse laser was designed based on Yb-doped fiber-bulk hybrid amplification technology. The laser was consisted of an Yb-doped all-fiber laser and two-stage bulk amplifiers. The first bulk amplifier was based on Yb: YAG single crystal fiber, and the second bulk amplifier was based on Yb: YAG rod with unpolished barrel. The all-fiber front end delivered 6.5 W average power, 52.9 MHz repetition rate and 47.5 ps pulse duration. The single crystal fiber amplifier obtained an average power of 40 W at the backward pump power of 182 W through a single-pass amplification. The Yb: YAG rod amplifier outputted an average output power of 122.9 W at the backward pump power of 307 W in single-pass configuration. After removing the depolarization part introduced by thermal effect, an average output power of 107.3 W with linear polarization state was obtained, and the

收稿日期: 2021-07-02; 修订日期: 2021-08-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0405201); 国家自然科学基金 (61527822)

作者简介: 徐岩, 男, 博士生, 主要从事高功率激光放大器方面的研究。

导师简介: 王璞, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率光纤激光器、大能量中红外超快激光器、非线性频率转换、特种光纤研制等方面的研究。

通讯作者: 彭志刚, 男, 博士后, 博士, 主要从事高功率光纤激光器、大能量中红外超快激光器等方面的研究。

corresponding slope efficiency was 26.1%. The pulse width of 12.1 ps and center wavelength of 1030.6 nm with spectral width of 2.4 nm were achieved. At the maximum output power of 107.3 W, a beam quality factor of 1.45 and 1.20 were measured along the vertical and horizontal direction, respectively.

**Key words:** laser amplifier; ultrashort pulse; hybrid amplification

## 0 引言

超短脉冲激光通常是指脉冲宽度在皮秒和飞秒量级的脉冲激光,具有窄脉宽、高峰值功率等特点,在工业、科研和国防等领域具有重要应用<sup>[1-4]</sup>。在实际应用中,往往需要激光器具有高平均功率、高峰值功率和高光束质量的特性,同时也要求激光器具有更低的成本,更简单的结构和更好的稳定性。光纤-固体混合放大技术<sup>[5]</sup>可以将光纤激光器单程增益高、光束质量好、散热性能好、结构紧凑等优势 and 固体放大器非线性效应弱、可承受峰值功率高、制备容易等优势结合,是实现结构紧凑、成本低廉的超短脉冲激光输出的有效技术手段。

单晶光纤 (Single crystal fiber, SCF) 是近年发展起来的一种新型的激光放大技术<sup>[6]</sup>。与板条放大器、碟片放大器和低温冷却 Yb:YAG 放大器等放大技术相比,SCF 放大器结构简单、搭建便捷,因此引起了许多研究人员的关注。目前用做高功率放大的 SCF 主要为直径小于 1 mm、长度几十毫米的无包层圆柱状 Yb:YAG 晶体,泵浦光在 SCF 内以波导的形式传播,信号光通过自由空间的形式传播。泵浦光的波导作用使较长晶体中的泵浦光与信号光的重叠度更高,提升了放大效率,并且 SCF 较大模场面积可以有效避免非线性效应,可以在不采用啁啾脉冲放大技术的情况下对飞秒脉冲直接放大。2015 年, JDSU 公司的 Markovic 等使用两级 Yb:YAG 单晶光纤模块组成的主振荡级功率放大 (Master Oscillator Power Amplifier, MOPA) 系统,获得了平均功率为 160 W、脉冲宽度 800 fs、重复频率 83 MHz 的输出,光束质量为 1.9<sup>[7]</sup>。2020 年,德国斯图加特大学的 F. Beirou 等采用单级 Yb:YAG 单晶光纤模块获得了 290 W 的飞秒脉冲输出,水平和垂直方向的光束质量因子分别为 2.4 和 3.4<sup>[8]</sup>。

近年来,研究人员对在室温下直接采用高亮度光纤耦合半导体激光器 (Laser diode, LD) 泵浦传统的棒状 (块状) Yb:YAG 晶体产生了很大兴趣。在立陶宛物

理科学与技术中心和立陶宛 Ekspla 公司等单位各自的工作中,不具有泵浦波导结构的 Yb:YAG 晶体也表现出了良好的放大结果,表明泵浦波导带来的优势并不显著<sup>[9-10]</sup>。由于普通棒状 (块状) Yb:YAG 晶体相比 SCF 更容易制备,因此直接采用棒状 (块状) Yb:YAG 晶体作为放大器增益介质在成本上十分有优势。笔者课题组在 2019 年采用由光纤前端和三级棒状 Yb:YAG 晶体放大器组成的 MOPA 系统,获得了平均功率 100.4 W、重复频率 20 MHz、脉冲宽度 7 ps 的输出<sup>[11]</sup>。除此之外,据笔者所知在常温下直接采用无侧面抛光的棒状 (块状) Yb:YAG 晶体进行百瓦级放大的工作仍鲜有报道。

文中报道了基于光纤-固体混合放大技术的高平均功率、高重复频率的超短脉冲 MOPA 系统。系统由中心波长 1 032.9 nm 的超短脉冲光纤激光器和两级固体放大器组成。第一级固体放大器为  $\Phi 1 \times 30$  mm、掺杂浓度 1 at.% 的 SCF 放大器,第二级为由  $\Phi 2 \times (5+40+5)$  mm、掺杂浓度 1 at.% 的无侧面抛光键合棒状 Yb:YAG 晶体组成的主放大级。最终实现平均功率 107.3 W、重复频率 52.9 MHz、脉冲宽度 12.1 ps 的线偏振激光输出,光束质量因子  $M_x^2=1.45$ ,  $M_y^2=1.20$ 。

## 1 数值模拟

在描述用于泵浦的光纤耦合 LD 的输出性能时,研究人员常采用亮度这一术语,对于输出功率一定的激光器,光束质量越高,对应的亮度越高,其公式为:

$$L = \frac{P}{M_x^2 M_y^2 \lambda^2} \quad (1)$$

式中:  $L$  为亮度;  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为激光束在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的光束质量因子;  $\lambda$  为激光波长;  $P$  为激光功率。对于光纤耦合 LD,其输出光束质量可以表示为:

$$M_p^2 = \frac{\pi \times NA \times r_f}{\lambda} \quad (2)$$

光纤耦合 LD 光束质量与耦合输出光纤的纤芯半径  $r_f$  与数值孔径 NA 有关,对于中心波长 940 nm、纤

芯直径 105 μm、NA=0.22 的泵浦 LD,最大输出功率 150 W 时,其亮度为 11.39 MW/(cm<sup>2</sup>·sr),而采用输出光纤纤芯直径 200 μm,NA=0.22 的合束器对三个 150 W 的泵浦 LD 进行合束,在最大输出功率 450 W 时,亮度为 9.42 MW/(cm<sup>2</sup>·sr),其亮度低于纤芯直径 105 μm、NA=0.22 的 LD。更高亮度意味着信号光与泵浦光的

匹配更好,放大效率更高。通过数值模拟对比了分别采用以上两种不同泵浦设置时激光放大器的放大效率。模拟采用 Φ2×(5+40+5) mm、掺杂浓度 1 at.% 的无侧面抛光棒状 Yb:YAG 晶体作为增益介质,在模拟中使用常温下的 Yb:YAG 晶体物性参数如表 1 所示<sup>[12-13]</sup>。

表 1 常温下掺杂浓度 1 at.% 的 Yb:YAG 物性参数

Tab.1 Physical property parameters of Yb:YAG with a doping concentration of 1 at.% at room temperature

Parameter	Symbol	Value	Unit
Lifetime for excited level	$\tau$	0.95	ms
Absorption wavelength	$\lambda_p$	940	nm
Laser wavelength	$\lambda_l$	1 030	nm
Absorption cross section at $\lambda_p$	$\sigma_{ap}$	$0.75 \times 10^{-20}$	cm <sup>2</sup>
Emission cross section at $\lambda_p$	$\sigma_{ep}$	$0.15 \times 10^{-20}$	cm <sup>2</sup>
Absorption cross section at $\lambda_l$	$\sigma_{as}$	$0.16 \times 10^{-20}$	cm <sup>2</sup>
Emission cross section at $\lambda_l$	$\sigma_{es}$	$2.1 \times 10^{-20}$	cm <sup>2</sup>
Density of Yb <sup>3+</sup> ions	$N$	$1.38 \times 10^{-26}$	m <sup>-3</sup>

Yb:YAG 晶体放大器采用单通放大方式,利用空间步进的光束传播法模拟放大器中的增益,其速率方程为<sup>[14-15]</sup>:

$$I_p(z + dz) = I_p(z) \exp((-\sigma_{ap}N_1 + \sigma_{ep}N_2)dz) \quad (3)$$

$$I_s(z + dz) = I_s(z) \exp((\sigma_{es}N_2 - \sigma_{as}N_1) dz) \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{\sigma_{ap} \frac{\lambda_p I_p}{hc} + \sigma_{as} \frac{\lambda_l I_s}{hc}}{(\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \frac{\lambda_p I_p}{hc} + (\sigma_{as} + \sigma_{es}) \frac{\lambda_l I_s}{hc} + \frac{1}{\tau}} \times N \quad (5)$$

$$N_1 = N - N_2 \quad (6)$$

式中:  $I_p(r, z)$ 和 $I_s(r, z)$ 分别表示泵浦光和信号光的强度分布,其值与晶体半径  $r$  和长度  $z$  有关;  $N_2$  表示上能级粒子数;  $N_1$  为下能级粒子数。当光束质量一定时,对于固定大小的泵浦腰斑半径,可以根据以下公式计算泵浦光在传播方向上的腰斑半径变化情况<sup>[11]</sup>:

$$\omega_p(z) = \omega_{p0} \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_p \cdot M_p^2 \cdot (z - z_{p0})}{\pi n \omega_{p0}^2} \right)^2} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_p$  为泵浦光波长;  $M_p^2$  为泵浦源的光束质量;  $z_{p0}$  为腰斑在晶体中的位置;  $\omega_{p0}$  为泵浦腰斑半径,在大多数情况下,泵浦光束是轴对称的,其强度分布可以用超高斯函数来描述,据此可以得到泵浦光在晶体中的强度分布<sup>[12]</sup>。为了简化计算,假设信号光在传播过

程中光束直径不变,并等于泵浦光腰斑直径,强度为高斯分布。信号光波长为 1 030 nm,泵浦源的波长为 940 nm,都为单色光,并且不考虑热效应,模拟信号光功率分别为 6 W 和 40 W 时的放大效率,结果如表 2 所示。

表 2 采用不同亮度泵浦源时的最大输出功率与增益

Tab.2 Maximum output power and gain when using different brightness pump sources

$I_s/W$	$\Phi/\mu\text{m}$	NA	Max pump power/W	Max output power/W	Gain
6	105	0.22	150	48.4	8.1
6	200	0.22	450	80.8	13.5
40	105	0.22	150	137.0	3.4
40	200	0.22	450	208.4	5.2

通过模拟结果可以发现,在输入信号光功率相同时,具有更高亮度的泵浦源放大效率更高,但是受到最大泵浦功率的限制,可获得的输出功率有限。当采用同一个泵浦源时,通过提高输入的信号光功率,可以有效提升泵浦功率的提取效率。为了获得更高的输出功率,可以在主放大级采用亮度较低、平均功率更高的泵浦源,在牺牲一定的放大效率的情况下,获得更高的输出功率。因此在实验中,笔者在主放大级

采用了亮度较低,但是泵浦总功率更高的泵浦源以获得更高的输出功率。

## 2 实验装置

光纤-固体混合 MOPA 系统实验装置如图 1 所示。全光纤前端由自制的被动锁模光纤振荡器和两级光纤放大器组成,采用全保偏器件,如图 1(a)所示。种子源由光纤振荡器和第一级预放大器组成。光纤振荡器采用 SESAM 作为可饱和吸收体,以 CFBG 为另一端腔镜,结构为线型腔,增益介质为 Nufern 公司的单模掺镱光纤,长度为 1 m,在 976 nm

处的吸收系数为 250 dB/m,信号光从 CFBG 输出后通过由一段长度 0.5 m 长的同样的增益光纤组成预放大器,振荡器和预放大器使用同一个中心波长 976 nm 的 LD 进行反向泵浦。信号光经过一个隔离器之后,被一段长度 80 m 的 Nufern 公司 PM980 光纤展宽。第一级光纤放大器采用的增益光纤与振荡器的增益光纤相同,长度也为 1 m;第二级光纤放大器的增益介质为长度 1 m 的 20  $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$  多模双包层掺镱光纤 (Liekki Yb1200-20/125DC-PM),在 976 nm 处的吸收系数为 30 dB/m,采用的泵浦源 (BWT Inc.) 最高输出功率为 25 W。

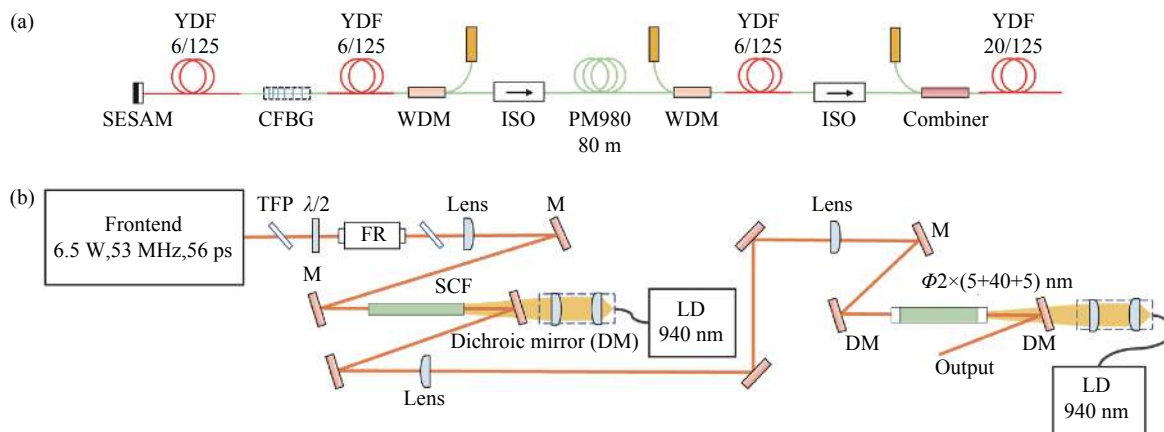


图 1 光纤-固体混合 MOPA 系统实验装置示意图。(a) 全光纤前端结构示意图;(b) 光纤-固体混合放大系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber-bulk hybrid MOPA system. (a) Schematic diagram of all-fiber front-end structure; (b) Schematic diagram of fiber-bulk hybrid amplification system

光纤前端输出的信号光经过一级端面泵浦的 SCF 放大器 (Fibercryst Inc.) 和一级端面泵浦的无侧面抛光的键合棒状 Yb:YAG 晶体主放大器进行单通放大。信号光经过焦距 20 mm 的凸透镜准直后,通过由半波片 ( $\lambda/2$ )、薄膜偏振片 (Thin-film polarizers, TFP)、法拉第旋转器 (Faraday rotators, FR) 和另一个 TFP 组成的空间隔离器,被一个焦距 500 mm 的凸透镜聚焦,测得此时的信号光腰斑直径约为 420  $\mu\text{m}$ ,经过一组平面高反镜反射,将信号光腰斑置于  $\Phi 1 \times 30 \text{ mm}$ 、掺杂浓度 1 at.% 的 SCF 中间,SCF 放大器的冷却水温度为 16  $^{\circ}\text{C}$ 。泵浦源为最大输出功率 200 W 的 940 nm 光纤耦合 LD (BWT Inc.),纤芯直径 135  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.22,采用反向泵浦方式,通过 50 mm:150 mm 的透镜组合将光纤耦合 LD 输出的泵浦光成像至晶体,腰

斑距离晶体后端面约 3 mm。同时,笔者还对比了采用最大输出功率 150 W、纤芯直径 105  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的 940 nm 光纤耦合 LD(BWT Inc.) 的放大结果。

光纤前端输出的信号光经过 SCF 放大器单通放大后,经过焦距 200 mm 的凸透镜准直。为了避免信号光由于高功率泵浦时的热透镜导致的光束聚焦对晶体端面镀膜带来的损伤,使用一片焦距 400 mm 的凸透镜将信号光腰斑聚焦于晶体入射端面前方约 65 mm,信号光以发散的形式入射到无侧面抛光的棒状 Yb:YAG 晶体中,晶体直径 2 mm,掺杂部分长度为 40 mm,掺杂浓度为 1 at.%,两端键合有长度 5 mm 的未掺杂 YAG 端帽,冷却水温度同样为 16  $^{\circ}\text{C}$ 。主放大级的泵浦源使用 1 个 3 $\times$ 1 的合束器将 3 个最大输出功率 150 W 的 940 nm 光纤耦合 LD 进行合束,合束器

输出端的光纤为 200  $\mu\text{m}$ /220  $\mu\text{m}$  多模光纤, 数值孔径 0.22, 同样采用反向泵浦方式, 通过 50 mm:100 mm 的透镜组合将泵浦光成像在晶体内部, 并使泵浦腰斑在避免泵浦光泄漏的情况下尽量深入晶体。

### 3 实验结果与分析

种子源输出总功率为 64.6 mW, 使用 25 GHz 带宽的高速示波器 (Agilent, DSO-X 92504A) 和 10 GHz 的光电探测器测得输出的重复频率为 52.9 MHz, 通过分辨率 0.02 nm 的光谱分析仪 (YOKOGAWA, AQ6370B) 测得中心波长为 1 032.9 nm, 3 dB 光谱宽度 26.1 nm, 测得的脉冲序列和光谱形状如图 2(a) 和图 2(b) 所示。

输出的信号光经过预放大后, 又通过双包层掺镱光纤进行放大, 输出功率和泵浦功率的关系如图 3(a) 所示, 为了避免出现放大过程中的受激拉曼效应, 使用的泵浦功率最高为 20 W, 此时信号光输出功率

6.5 W。在输出功率 6.5 W 时使用 APE 自相关仪测得光纤前端输出的脉冲宽度为 47.5 ps, 如图 3(b) 所示。在输出功率 6 W 时测得的输出激光 3 dB 光谱宽度为 12.7 nm, 中心波长为 1 032.9 nm, 如图 3(c) 所示。由于包层放大采用的 20  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$  的增益光纤为多模光纤, 为了保证光纤前端输出的光束质量, 对包层放大的光纤盘绕进行了优化, 将光纤的盘绕直径缩小以滤除高阶模, 最终获得了光束质量  $M^2$  为 1.05 的信号光输出, 如图 3(d) 所示。

在光纤前端输出功率 6.5 W 的基础上, 采用  $\Phi 1 \times 30$  mm、掺杂浓度 1 at.% 的 SCF 模块进行了第一级固体放大, 并且对比使用两种不同亮度的泵浦源获得的放大效果。采用最大输出功率 150 W、纤芯直径 105  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的泵浦源时, 通过单通放大获得的最大输出功率为 24.3 W, 此时实测泵浦功率为 136 W, 通过双通放大获得的最大输出功率为 37.1 W;

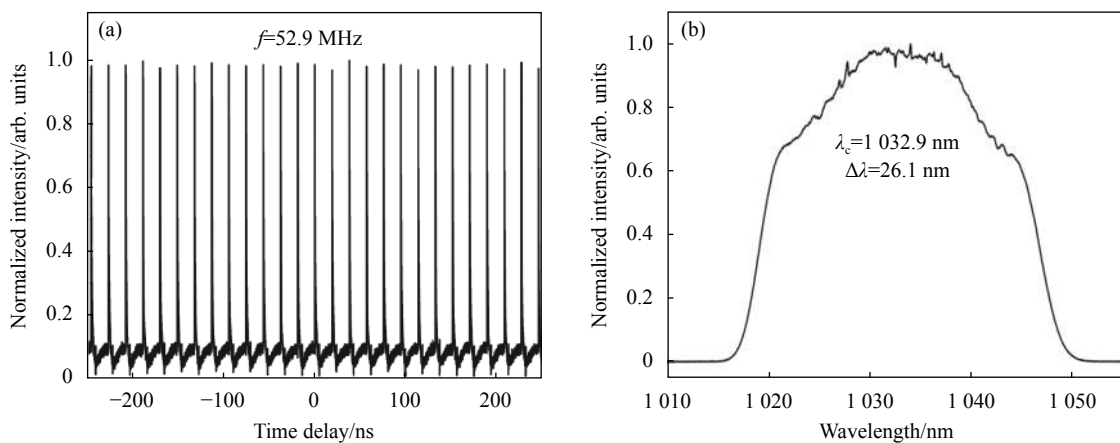
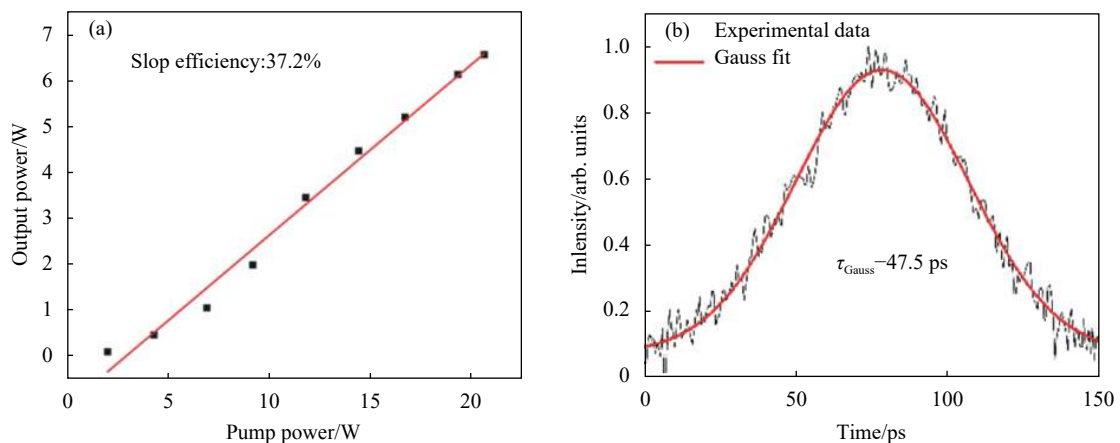


图 2 全光纤振荡器输出参数。(a) 脉冲序列; (b) 输出光谱

Fig.2 Output parameters of all fiber oscillator. (a) Pulse sequence; (b) Output spectrum





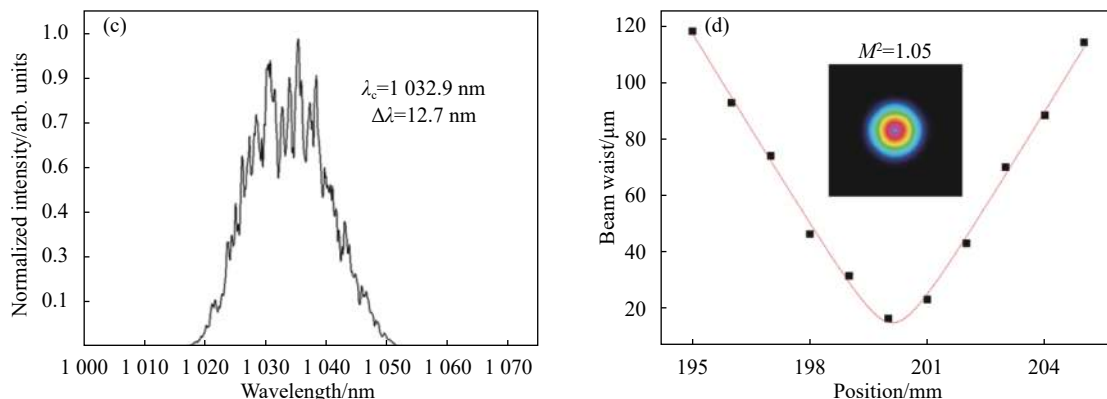


图 3 全光纤前端输出参数。(a) 主放大级输出功率和泵浦功率的关系; (b) 脉冲宽度; (c) 输出光谱; (d) 光束质量

Fig.3 Output parameters of all-fiber front-end. (a) Output power versus pump power of the main amplifier stage; (b) Pulse width; (c) Output spectrum; (d) Beam quality

而采用最大输出功率 200 W、纤芯直径 135 μm、数值孔径 0.22 的泵浦源时,在泵浦功率 182 W 时通过单通放大可获得 40 W 的输出功率,泵浦功率和输出功率

的关系如图 4(a) 所示,此时放大斜效率为 18.6%。进一步通过双通放大获得最高 63.2 W 的输出功率,因此笔者决定采用 200 W 的泵浦源作为第一级 SCF 放

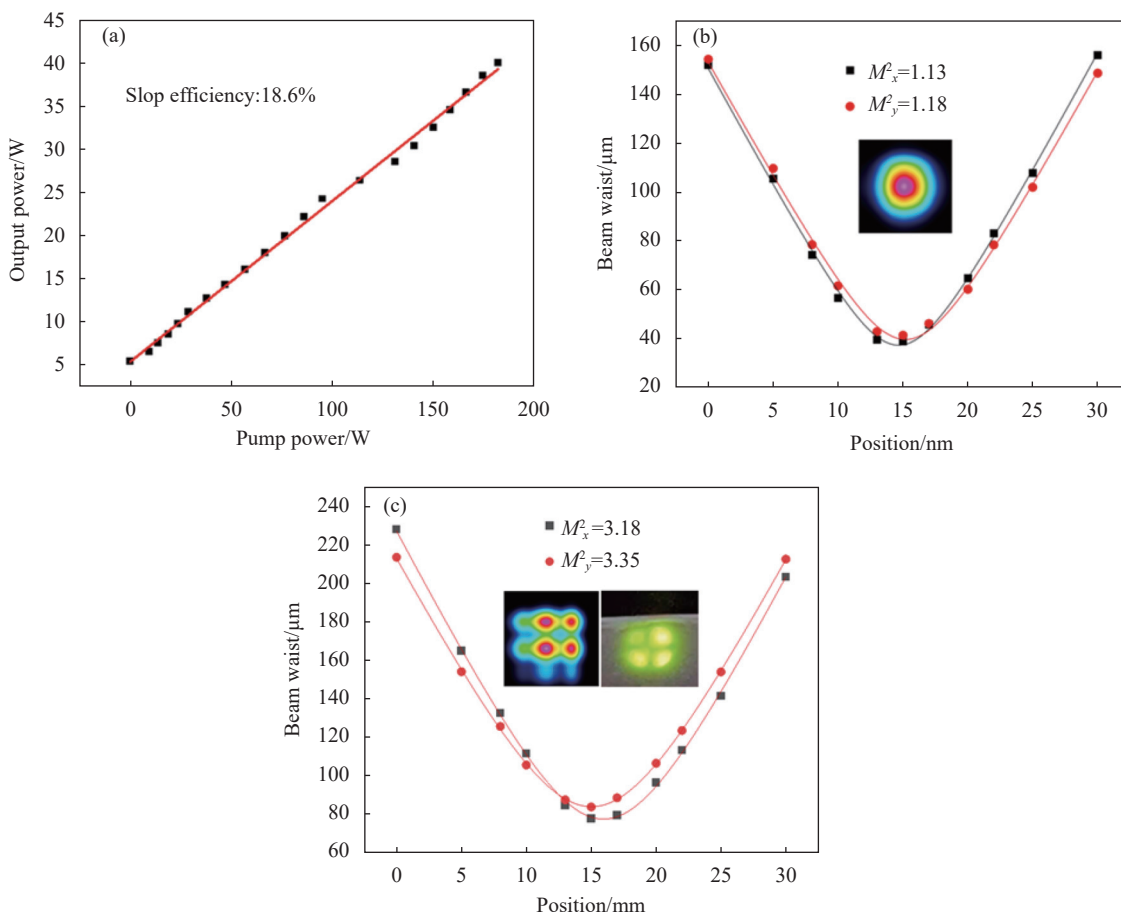


图 4 SCF 放大器输出参数。(a) 单通放大输出功率和泵浦功率关系; (b) 光束质量; (c) 热退偏信号光的光束质量

Fig.4 Output parameters of SCF amplifier. (a) Output power versus pump power of the single-pass amplification; (b) Beam quality; (c) Beam quality of the thermally depolarized signal

大器的泵浦源。

在测量此时信号光的光束质量时笔者发现,在通过一个半波片和一个 TFP 进行功率衰减时,会观察到衰减后的激光存在明显的热退偏光斑形状,并且随着衰减强度的不同,热退偏光斑形状没有很大变化,激光强度变化只存在于热退偏光斑中间,这对第一级放大器输出信号光的光束质量测量存在不利影响,因此采用两组半波片和 TFP 的组合,第一组用于滤除热退偏,第二组用于衰减透过的线偏振信号光,并进行光束质量测量,最终测得信号光单通放大的光束质量因子  $M_x^2=1.13$ ,  $M_y^2=1.18$ , 如图 4(b) 所示。双通放大获得的输出功率更高,但是光束质量相比单通放大差,因此决定第一级 SCF 放大器使用单通放大的形式。在观察热退偏光斑形状和泵浦功率的关系时发现,随着泵浦功率超过 100 W,可以观察到典型的热退偏光斑。笔者对热退偏激光的光束质量进行了测量,得到的光束质量因子  $M_x^2=3.18$ ,  $M_y^2=3.35$ , 如图 4(c) 所示,

图中左边为光束质量分析仪观察到泵浦功率 180 W 时的热退偏光斑形状,右边为用激光观察卡(Thorlabs inc.) 观察到的光斑形状。

滤除热退偏部分后的信号光以发散的形式入射到主放大级的键合 Yb:YAG 晶体内,在反向泵浦功率 307 W 时,获得 122.9 W 的最大输出功率,测得此时的输出光谱宽度 2.4 nm,中心波长 1 030.6 nm,如图 5(a) 所示。通过半波片和 TFP 的组合配置也观察到了和 SCF 放大器同样的热退偏情况。在滤除掉 15.6 W 的热退偏信号光功率后,获得了平均功率 107.3 W 的线偏振激光输出,第二级固体放大器输出的总功率、线偏振光功率和泵浦功率关系如图 5(b) 所示,由自相关仪测得的脉冲宽度为 12.1 ps,如图 5(c) 所示。测得此时光束质量因子  $M_x^2=1.45$ ,  $M_y^2=1.20$ , 如图 5(d) 所示。

为了获得更高的泵浦功率,笔者在第二级棒状 Yb:YAG 晶体放大器前增加了一个同向泵浦的光纤

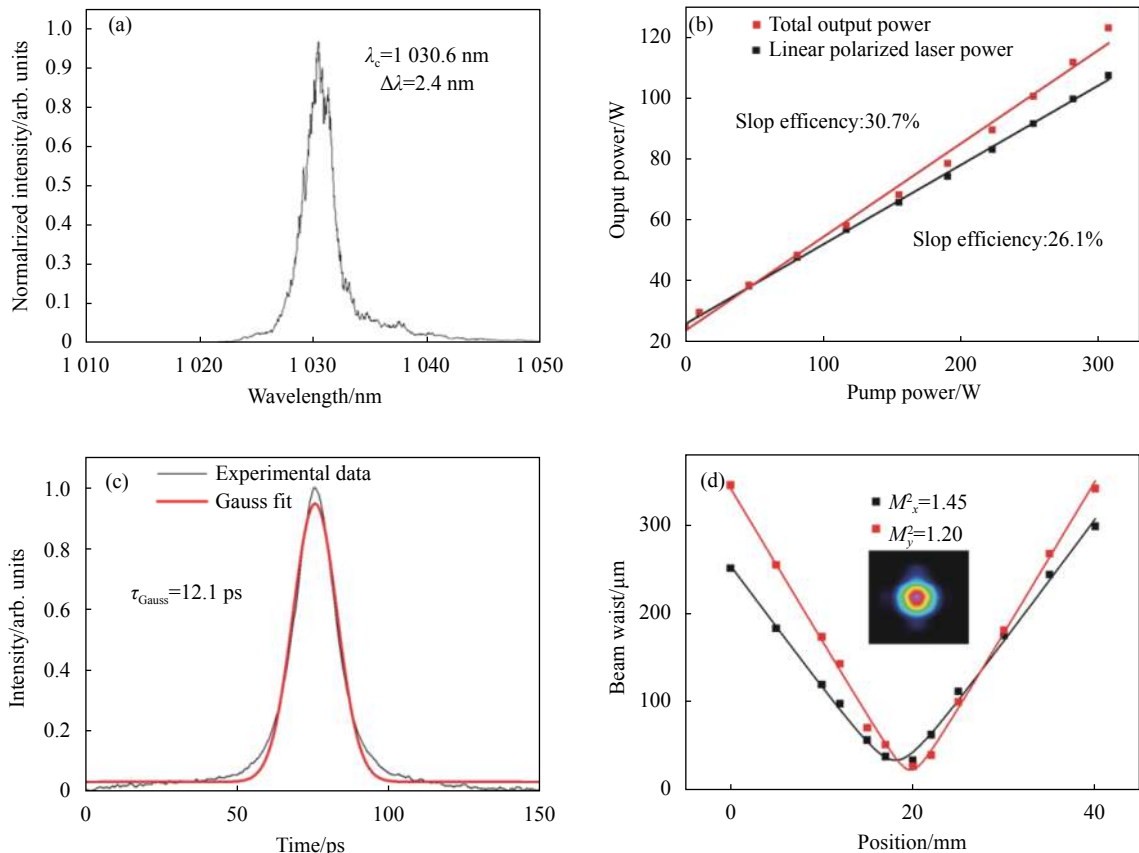


图 5 主放大器输出参数。(a) 输出光谱;(b) 主放大器的输出功率和泵浦功率关系;(c) 输出脉冲宽度;(d) 光束质量

Fig.5 Output parameters of main amplifier. (A) Output spectrum; (b) Output power versus pump power of the main amplifier; (c) Output pulse width; (d) Beam quality

耦合 LD 泵浦源, 中心波长 940 nm, 纤芯直径为 135  $\mu\text{m}$ , 数值孔径 0.22, 测得其最大输出功率 185 W。在同向泵浦功率 185 W, 反向泵浦功率约 187 W 时, 获得了 140 W 的输出功率。

## 4 结 论

文中报道了高平均功率、高重复频率的光纤-固体混合放大超短脉冲激光器。激光器由全光纤激光前端和两级固体放大器组成。基于 CFBG 的光纤振荡器中心波长为 1 032.9 nm, 重复频率 52.9 MHz, 经过两级光纤放大器后, 获得最大平均功率为 6.5 W、脉冲宽度 47.5 ps, 光谱宽度 12.7 nm 的输出。第一级固体放大器为  $\Phi 1 \times 30$  mm、掺杂浓度 1 at.% 的 SCF 放大器, 经过对比实验, 使用最大输出功率 200 W、纤芯直径 135  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤耦合 LD 作为泵浦源, 采用单通放大形式, 在单端反向泵浦功率 182 W 时获得最大 40 W 的输出功率, 此时光束质量因子  $M_x^2=1.13$ ,  $M_y^2=1.18$ 。第二级固体主放大器为  $\Phi 2 \times (5+40+5)$  mm、掺杂浓度 1 at.% 的非侧抛棒状 Yb:YAG 晶体, 在单端反向泵浦功率为 307 W 时输出的总功率为 122.9 W, 滤除 15.6 W 的热退偏信号后, 获得平均功率 107.3 W 的线偏振超短脉冲激光输出, 测得此时脉冲宽度 12.1 ps, 光束质量因子  $M_x^2=1.45$ ,  $M_y^2=1.20$ 。实验证明: 在常温下直接采用棒状(块状)Yb:YAG 晶体作为主放大级, 可以承受较高的泵浦功率, 从而通过两级固体放大获得光束质量较好的百瓦级超短脉冲激光输出, 降低了放大器的成本, 并且结构更简单紧凑, 具有很好的发展前景。相比于数值模拟的结果, 实验中的 Yb:YAG 晶体在高功率泵浦时会受到热效应影响, 并且信号光和泵浦光的波长也不是理想的单色光, 而且晶体的吸收截面和发射截面等参数与温度和波长相关, 因此实际获得的输出功率低于模拟功率。未来通过进一步采用高功率、高亮度的泵浦源和改善 Yb:YAG 晶体的热管理, 相信能够进一步改善放大效率, 并且有望获得媲美 SCF 放大器的放大结果。

## 参考文献:

[1] Zhao Wanqin, Mei Xuesong, Wang Wenjun. Ultrashort pulse

laser drilling of micro-holes (part 1) —theoretical study [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0106008. (in Chinese)

[2] Zhao Wanqin, Mei Xuesong, Wang Wenjun. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes(part 2) -experimental study [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0242001. (in Chinese)

[3] Peng Hongpan, Yang Ce, Lu Shang, et al. All-solid-state picosecond radially polarized laser and its processing characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0106003. (in Chinese)

[4] Zhang Jiuru, Guan Yingchun. Surface functional microstructure of biomedical materials prepared by ultrafast laser: A review [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 199-213. (in Chinese)

[5] Xu Y, Peng Z G, Cheng Z C, et al. Research progress of ytterbium-doped fiber-solid high-power ultrashort pulse amplification [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501003. (in Chinese)

[6] Délen X, Aubourg A, Patrick Georges. Single crystal fiber for laser sources[C]// Proceedings of SPIE, Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices, 2015, 9342: 934202.

[7] Markovic V, Rohrbacher A, Hofmann P, et al. 160 W 800 fs Yb: YAG single crystal fiber amplifier without CPA [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25883-25888.

[8] Beirow F, Eckerle M, Graf T, et al. Amplification of radially polarized ultra-short pulsed radiation to average output powers exceeding 250 W in a compact single-stage Yb: YAG single-crystal fiber amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(9): 1-10.

[9] Veselis L, Bartulevicius T, Michailovas A. Generation of 40 W, 400 fs pulses at 1 MHz repetition rate from efficient, room temperature Yb: YAG double-pass amplifier seeded by fiber CPA system[C]//Proceedings of SPIE, Solid State Lasers XXIX: Technology and Devices, 2020, 11259: 1125925.

[10] Rodin A, Zopelis E. Comparison of Yb: YAG single crystal fiber with larger aperture CPA pumped at 940 nm and 969 nm[C]// 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2017: 1-5.

[11] Bu X B, Xu Y, Wang P. 100 W, 7 ps hybrid Yb-fiber and Yb: YAG thin-rod MOPA laser[C]//Sixth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application, 2020: 114553T.



- [12] Albrodt P, Délen Xavier, Besbes M, et al. Simulation and experimental investigation of beam distortions in end-pumped laser rod amplifiers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(12): 3004-3013.
- [13] Pflaum C, Hartmann R, Rahimi Z, et al. Modeling and simulation of ultra-short pulse amplification[C]//Proceedings of SPIE, Solid State Lasers XXV: Technology and Devices, 2016, 9726: 972610.
- [14] Lee B, Chizhov S A, Sall E. G, et al. Laser amplification in Yb: YAG thin rods of different geometries: simulation and experiment [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(10): 2594-2599.