

百瓦级 1030 nm 皮秒脉冲掺镱全光纤激光器

孙若愚 金东臣 曹 彧 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘要 报道了 1030 nm 高功率被动锁模皮秒脉冲掺镱光纤激光器。该激光器为全光纤结构, 采用主振荡功率放大 (MOPA) 技术, 由皮秒种子源与三级掺镱光纤放大器组成。种子源使用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 进行被动锁模, 输出脉冲中心波长为 1030.4 nm、3 dB 光谱宽度为 0.15 nm、脉冲宽度为 30.7 ps、重复频率为 29.0 MHz、输出功率为 30 mW。通过三级掺镱光纤放大器后, 最终在 30 μm /250 μm 双包层掺镱光纤中实现了平均功率为 101 W 的皮秒脉冲激光输出, 3 dB 光谱宽度为 1.46 nm, 脉冲宽度为 36.6 ps, 放大器斜率效率为 76.7%, 单脉冲能量为 3.48 μJ , 峰值功率为 97 kW, 光束质量 $M^2 = 2.78$ 。

关键词 激光器; 主振荡功率放大器; 被动锁模; 掺镱光纤

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1002004

Hundred-Watt-Level 1030 nm Ytterbium-Doped Picosecond All-Fiber Laser

Sun Ruoyu Jin Dongchen Cao Yi Wang Pu

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A high power 1030 nm passively mode-locked ytterbium-doped picosecond fiber laser by master oscillator power amplifier (MOPA) in all-fiber configuration is demonstrated. The laser system consists of the picosecond seed and three stages of ytterbium-doped all-fiber amplifiers. The seed is mode-locked by semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). And a stable output is obtained with 30.7 ps pulse width, 29.0 MHz repetition rate, and 30 mW average output power. The laser operates at 1030.4 nm with a spectral width of 0.15 nm. After three stages of fiber amplification, the final output power is scaled up to 101 W in a 30 μm /250 μm double cladding ytterbium-doped fiber with the slope efficiency of 76.7%. The laser performance with the pulse width of 36.6 ps, pulse energy of 3.48 μJ , peak power as high as 97 kW operating at 1030.4 nm with bandwidth of 1.46 nm is achieved, and the beam quality M^2 is 2.78.

Key words lasers; master oscillator power amplifier; passively mode-locked; ytterbium-doped fiber

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 140.4050; 140.3615

1 引 言

近年来 1.0 μm 超短脉冲光纤激光器以其体积小、效率高、性能稳定等特点, 在工业加工、科学研究、军事国防等领域展现出广泛的应用前景, 已成为

当前激光技术领域的一个研究热点^[1-2]。然而在超短脉冲光纤激光器中, 由于光纤芯径尺寸的限制, 导致峰值功率在超过一定阈值后会产生一系列非线性效应, 从而限制激光平均输出功率的进一步提高^[3],

收稿日期: 2014-03-26; 收到修改稿日期: 2014-04-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235010)、国家自然科学基金面上项目(61177048)、北京市自然科学基金 B 类重点项目(KZ2011100050011)

作者简介: 孙若愚(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器、高功率光纤放大器等方面的研究。

E-mail: sunruoyu999@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王 璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

故研制兼具高平均功率及高峰值功率的超短脉冲光纤激光器成为一大挑战。

为解决这一问题,目前主要有以下几种方案:1)使用啁啾脉冲放大系统,将脉冲展宽后再进行放大,以此来降低峰值功率减小非线性效应,但后续压缩时光路设计复杂、对光栅的参数要求高;2)通过增大光纤芯径尺寸,提高非线性效应阈值,如使用掺杂稀土元素的大模场面积光纤^[4]或大间距光子晶体光纤^[5-6],但这些特种光纤造价昂贵,系统成本高;3)利用晶体放大级进行功率放大^[7],同样是利用晶体介质大芯径尺寸的特点提高非线性效应阈值,且该增益晶体的生产工艺已较为成熟,制作成本合理。2013年巴黎第十一大学 Délen 等^[8]利用 40 mm Yb:YAG晶体对1030 nm、10 kHz 激光进行放大,获得 150 ps、1.3 mJ 激光输出,峰值功率接近10 MW,这是在石英基质光纤放大器中难以达到的,因为在石英基质中当峰值功率高于 4 MW 后会引发自聚焦效应,从而损坏增益介质,这使得晶体放大器的优势更为明显。且如果同时结合啁啾脉冲放大技术使用的话,可使峰值功率达到吉瓦量级。

综上所述,使用光纤激光器结合晶体放大器的研究方案有很好的发展前景。目前 1.0 μm 波段已商业化的增益晶体主要有 Yb:YAG、Nd:YAG 等,其中 Yb:YAG 晶体有宽达 8 nm 的增益带宽,更适合于激光放大器的使用需求。且 Yb:YAG 的发射波长在 1030 nm,此波段的激光在光参量振荡器、激

光雷达、激光医疗中有广泛的应用^[9-10]。2006年 Nufern 公司利用大芯径光纤布拉格光栅(FBG),实现中心波长 1030 nm、242 W 的连续激光输出,斜率效率为 73%^[11]。2009年华东师范大学 Li 等^[12]报道了 1033~1053 nm 可调谐、280 W 纳秒脉冲掺镱光纤激光器。2011年中国科学院上海光学精密机械研究所的周翠芸等^[13]利用全光纤主振荡功率放大(MOPA)技术,对 1030 nm、50 kHz、6.53 ns 的脉冲,实现 5.07 W 的全光纤脉冲激光放大,其输出光束质量为 1.91。

基于以上研究,本文报道了 1030 nm 高功率百瓦级皮秒脉冲光纤激光器,其 3 dB 光谱宽度与 Yb:YAG发射峰相匹配,为下一步应用 Yb:YAG 进行功率放大做准备。该激光器使用全光纤 MOPA 结构设计,种子源采用中心波长 1030.4 nm 的被动锁模掺镱光纤激光器,结合三级掺镱光纤放大器进行主振荡功率放大,实现了平均功率为 101 W、脉冲宽度为 36.6 ps、3 dB 光谱宽度为 1.46 nm、峰值功率为 97 kW 的皮秒脉冲输出,放大器斜率效率为 76.7%。

2 实验装置

使用被动锁模及主振荡功率放大技术搭建了一套高功率百瓦级全光纤皮秒脉冲激光系统^[14],该实验装置主要包括 1030 nm 被动锁模掺镱光纤激光器及三级掺镱光纤放大器,实验装置结构如图 1 所示。

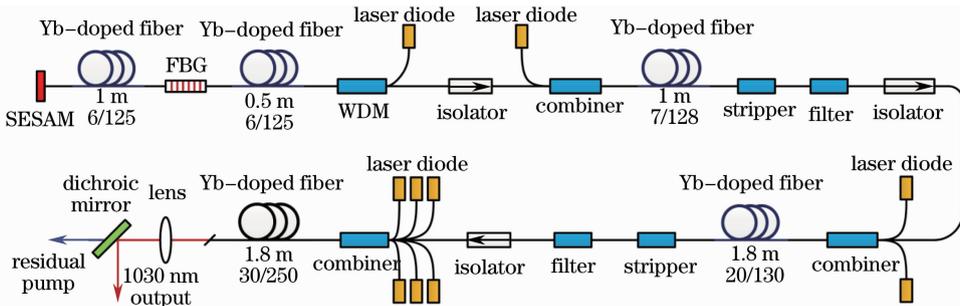


图 1 百瓦级全光纤皮秒脉冲激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the 101 W all-fiber picosecond pulse fiber laser

种子源采用纤芯抽运的线形腔结构,抽运源为中心波长 976 nm、最大输出功率 450 mW 的半导体激光器。增益介质为 1 m 长的单包层掺镱光纤,其在 976 nm 处的吸收系数为 250 dB/m。选择中心波长为 1030.4 nm、反射率为 73%、带宽为 0.18 nm 的 FBG 作为其中一个腔镜,同时起到波长选择和激光输出的作用,使用半导体可饱和吸收镜(SESAM)进行被动锁模。激光从 FBG 输出后再经过一段

0.5 m 长的 6 μm/125 μm (纤芯半径/包层半径)单包层掺镱光纤进行功率放大^[15]。

种子光后的两级预放大均采用正向抽运方式,第一级使用中心波长为 976 nm、输出功率为 10 W 的半导体激光器作为抽运源,增益介质使用 1 m 长的单模双包层掺镱光纤,其在 976 nm 处的吸收系数为 5.4 dB/m,之后使用一段单包层光纤(Nufern HI1060)对抽运光进行剥离。激光输出前通过一个

2 nm 带宽的光谱滤波器减弱放大过程中产生的自放大辐射(ASE)噪声。第二级预放大使用两个中心波长为 976 nm 的半导体激光器作为抽运源,使用 1.8 m 长的 20 μm /130 μm 多模双包层掺镱光纤作为增益介质该光纤在 976 nm 处的吸收系数为 8.7 dB/m,并通过一段 20 μm /125 μm 单包层光纤进行抽运光剥离。

经过两级预放大后将信号光通过一个(6+1) \times 1 的合束器耦合入主放大级,合束器对信号光的插入损耗小于 0.5 dB。抽运源使用 6 个 976 nm 的多模半导体激光二极管,最高可提供 124 W 抽运功率。使用 1.8 m 长,芯径尺寸 30 μm /250 μm 的双包层掺镱光纤作为增益介质,该光纤在 920 nm 处的吸收系数为 3.3 dB/m,光纤末端使用 8 $^\circ$ 角切割防止回光反射。经放大输出的激光准直后通过低通二向色镜进行抽运光剥离。实验中除输出准直透镜和二向色镜外,所有器件均使用光纤连接,实现了光路的全光纤化设计。且各级放大器间均加入偏振无关光纤隔离器,以防止放大过程中的后向散射光或端面反射对激光系统稳定性的影响。

3 实验结果及分析

在种子源阶段,提供足够的功率给下一级放大器,在谐振腔外加入一段预放大增益光纤,当纤芯抽运功率达到 300 mW 时,激光器得到 30 mW 稳定的被动锁模激光输出。使用 25 GHz 带宽的高速示波器(Agilent, DSO-X92504A)和 25 GHz 光电探测器测得脉冲重复频率 f 为 29.0 MHz,重复频率与激光器共振腔长度吻合。使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6373)测得中心波长 λ_c 及 3 dB 光谱宽度 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 分别为 1030.4 nm、0.15 nm,此时光谱出现凹陷,这是由于谐振腔输出的脉冲带有正啁啾,在正色散预放大光纤中受自相位调制(SPM)影响,产生的感应频率啁啾导致频谱展宽,这里需要强调的是 SPM 只会产生与光强有关的相移,不会影响脉冲形状^[16],实验中观测到的脉冲序列及光谱形状如图 2 所示。使用频谱分析仪[频谱测量范围(SPAN): 400 kHz;频率分辨率(RBW): 1 kHz]测得种子光的信噪比为 65 dB,证明锁模过程稳定,使用自相关仪(FR-103XL)测得种子光的脉冲宽度 t_{FWHM} 为 30.7 ps,如图 3 所示。

使用两级包层抽运掺镱光纤放大器,对种子光进行两次预放大,两级放大器均采用正向抽运方式,在两级预放大中,脉冲光谱依然受 SPM 效应的影

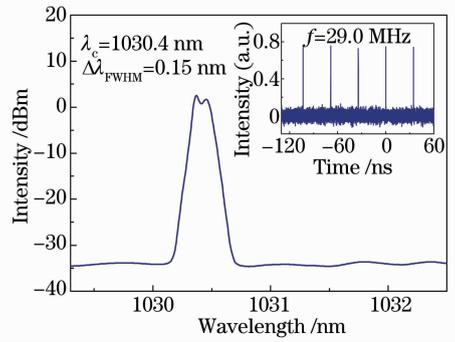


图 2 掺镱光纤激光器种子源光谱 (插图: 29.0 MHz 激光脉冲序列)

Fig. 2 Optical spectrum of the Yb-doped fiber oscillator (Insert is pulse train of the fiber oscillator at 29.0 MHz)

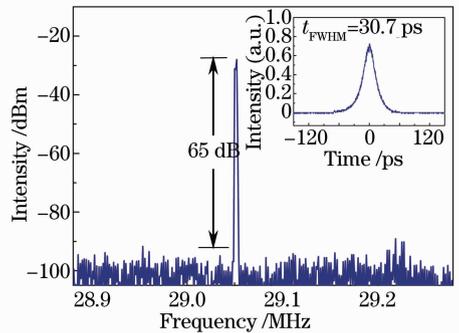


图 3 掺镱光纤激光器频谱图(插图: 平均功率为 30 mW 时激光脉冲的自相关轨迹)

Fig. 3 Radio frequency spectrum of the Yb-doped fiber oscillator (Insert is autocorrelation trace of the pulse of the Yb-doped fiber oscillator at average power of 30 mW)

响。在第一级预放大后,光谱呈现多峰结构且最外面的峰强度最大,这是 SPM 现象最为显著的特点。另外由于掺镱光纤激光器在 1030 nm 处的发射截面小于 1064 nm,且种子光信号功率较低,使得放大器很容易产生 ASE 现象,如图 4 插图所示,产生的 ASE

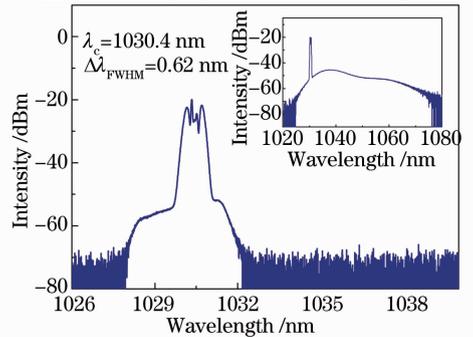


图 4 第一级掺镱光纤放大器光谱图 (插图为无 2 nm 光谱滤波器时的输出光谱)

Fig. 4 Optical spectrum of the first amplifier (Insert is optical spectrum without the insertion of 2 nm filter)

噪声,可覆盖 1030~1070 nm 的光谱范围。因此,为保证高质量 1030 nm 激光输出,加入了带宽 2 nm 的光谱滤波器,最终获得中心波长为 1030.4 nm、3 dB 光谱宽度为 0.62 nm 的激光输出,ASE 噪声得到了明显的抑制。经光纤隔离器后得到 250 mW 的激光输出,受到光谱滤波器可承受功率的限制,没有进一步提高输出功率。

在第二级预放大中使用两个多模半导体激光二极管作为抽运源,在抽运功率为 20 W 时,得到最大 10.36 W 的激光输出,斜率效率为 52%。将输出功率稳定在 5 W 时,对掺镱光纤放大器进行了 30 min 的检测,功率波动幅度小于 1%,可为下一级功率放大提供稳定的信号光。此时用光谱分析仪测得中心波长为 1030.4 nm、3 dB 光谱宽度为 1.38 nm,用自相关仪测得脉冲宽度为 34.8 ps,如图 5 所示。由于光谱滤波器的作用没有观察到 ASE 噪声及拉曼光谱成分,但脉冲依然受 SPM 效应影响发生了光谱展宽,SPM 产生的非线性相移与脉冲峰值功率、非线性参量和光纤有效长度成正比,其中非线性参量与有效模场面积成反比,所以通过增大纤芯直径或

减小光纤长度可为抑制 SPM 提供帮助。不过由于 Yb:YAG 晶体的吸收带宽可达 8 nm,所以实验中光谱的展宽并不会对后续研究造成影响。

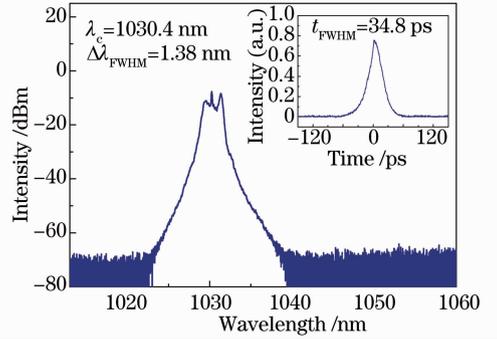


图 5 第二级掺镱光纤放大器 5 W 输出光谱 (插图为单脉冲自相关轨迹)

Fig. 5 Optical spectrum of the second amplifier at 5 W output (Insert is single pulse with 34.8 ps pulse width)

另外,在建立主放大级时考虑到不同光纤长度对激光放大的效率不同,过长的光纤会造成信号光重吸收,过短的光纤会对抽运光功率造成浪费,所以为确定使用增益光纤的最佳长度,进行了输出功率与光纤长度关系的数值模拟,描述掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的速率方程组为^[17]

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{\Gamma_s\sigma_{as}[P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h\nu_s A_c}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{1}{\tau} + \frac{\Gamma_s(\sigma_{es} + \sigma_{as})[P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h\nu_s A_c}}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z), \quad (3)$$

(1)式描述光纤不同位置处增益介质上的上能级粒子浓度 $N_2(z)$ 和前、后向抽运光功率 $P_p^+(z)$ 、 $P_p^-(z)$ 以及前、后向激光功率 $P_s^+(z)$ 、 $P_s^-(z)$ 的关系,(2)和(3)式分别描述了光纤不同位置处抽运光功率及激光功率的变化规律。其中 N 为纤芯中 Yb³⁺ 的掺杂离子浓度, A_c 为纤芯截面积, Γ_p 、 Γ_s 为抽运光和激光的功率填充因子, σ_{ap} 、 σ_{ep} 为抽运光的吸收和发射截面, σ_{as} 、 σ_{es} 为激光的吸收和发射截面。 τ 为 Yb³⁺ 上能级寿命, h 是普朗克常数, ν_p 和 ν_s 是抽运光和激光的频率。

基于(1)~(3)式,使用商用软件 RP Fiber Power 进行数值模拟。其中所用的增益光纤的 Yb³⁺ 掺杂离子浓度为 $1.02 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$,纤芯及包层半径分别为 15 μm 和 125 μm ,输入信号中心波长为

1030 nm、平均功率为 5 W、信号光损耗为 0.3 dB,选用正向抽运方式,抽运功率为 124 W。模拟显示,此型号光纤在对 1030 nm 激光放大时的最佳长度

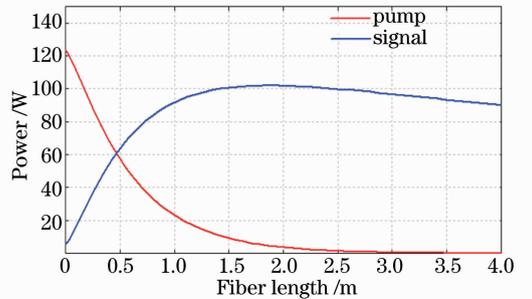


图 6 抽运功率及平均输出功率随增益光纤长度的变化
Fig. 6 Pump power and average output power versus the fiber length

为 1.8 m, 如图 6 所示。

由此, 在主放大过程中选用 1.8 m 长的增益光纤进行放大, 使用 6 个多模半导体激光二极管作为抽运源, 最大可提供 124 W 抽运功率。采用 30 μm /250 μm 双包层掺镱光纤作为增益介质, 由于增大了光纤的纤芯尺寸, SPM 对脉冲的影响明显减弱。最终经二向色镜剥离抽运光后, 实现了平均功率为 101 W 的皮秒脉冲输出, 平均输出功率随抽运功率的变化趋势如图 7 所示, 此时斜率效率 η 高达 76.7%, 实验点图并非完全线性增长, 这是因为抽运半导体激光二极管随功率和温度的变化会发生波长漂移。使用 25 GHz 高速示波器测量脉冲宽度为 36.6 ps, 使用光谱分析仪测得中心波长为 1030.4 nm, 3 dB 光谱宽度为 1.46 nm, 脉冲形状及输出光谱如图 8 所示。光谱呈现的三峰结构是由于 SPM 频谱最外面的峰强度较大, 导致主放大器对中心波长及左右两边频谱成分的放大效果更为明显。其较窄的光谱宽度及脉冲宽度为研制兼具高平均功率和高峰值功率的 Yb:YAG 晶体放大器奠定了基

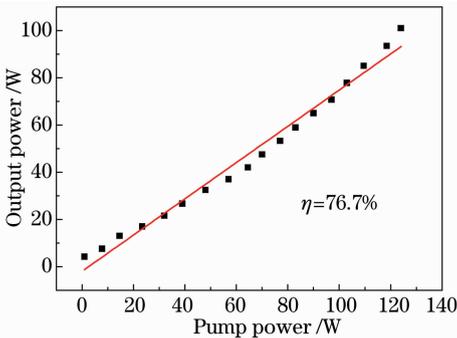


图 7 主放大级平均输出功率随抽运功率的变化
Fig. 7 Average output power versus pump power of the master amplifier

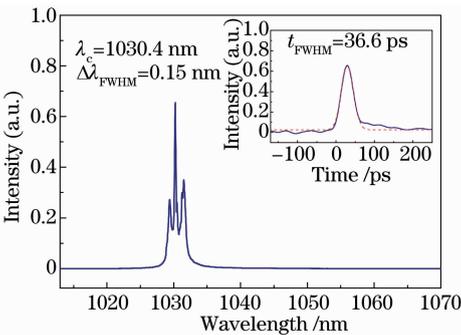


图 8 主放大级 101 W 时输出光谱
(插图为单脉冲形状)

Fig. 8 Optical spectrum of the master amplifier at average power of 101 W (Insert is single pulse with 36.6 ps pulse width)

础。此时, 最大单脉冲能量为 3.48 μJ 、峰值功率可达 97 kW, 受抽运能力的限制没有继续增加抽运功率。

同时, 实验测得光束质量 $M^2 = 2.78$, 如图 9 所示。根据归一化频率公式

$$V = \pi \cdot D \cdot NA / \lambda, \quad (4)$$

式中 D 为光纤直径, NA 为数值孔径, λ 为中心波长。理论要求当归一化频率 V 小于 2.405 时激光在光纤中才能实现单模运转。本实验中所用掺杂光纤的直径为 30 μm , 纤芯数值孔径为 0.07。经计算此光纤在 1030 nm 处的归一化频率 $V = 6.40$, 证明在激光放大到高功率时易出现高阶模传输, 这对下一级 Yb:YAG 放大器的放大性能会有一定影响, 因此在进一步的研究中可通过适当的模式匹配或光纤弯曲滤掉高阶模等方法改善光束质量, 提高输出性能。

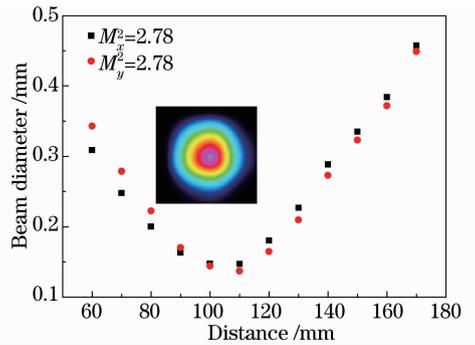


图 9 光束质量测量(插图为光斑二维形态)
Fig. 9 Beam quality measurement (Insert is an image of two-dimensional beam profile)

4 结 论

针对 Yb:YAG 晶体放大器的使用需求, 研制了基于 MOPA 结构的百瓦级 1030 nm 被动锁模掺镱光纤激光器。种子光中心波长为 1030.4 nm、脉冲宽度为 30.7 ps、重复频率为 29.0 MHz、平均功率为 30 mW。通过三级掺镱光纤放大器后, 最终实现平均功率为 101 W 的皮秒脉冲激光输出, 3 dB 光谱宽度为 1.46 nm, 脉冲宽度为 36.6 ps, 放大器斜率效率为 76.7%, 此时峰值功率高达 97 kW, 光束质量 $M^2 = 2.78$ 。其中心波长及光谱宽度与 Yb:YAG 晶体的发射波长相匹配, 为研制兼具高平均功率和高峰值功率的 Yb:YAG 晶体放大器奠定了基础。

参 考 文 献

1 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 135-138.

- 楼祺洪, 周 军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
- 2 Luo Wei, Dong Wenfeng, Yang Huabing, *et al.*. Development trend of high power lasers[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 845-852.
- 罗 威, 董文锋, 杨华兵, 等. 高功率激光器发展趋势[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 845-852.
- 3 Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. Nature Photonics, 2013, 7: 868-874.
- 4 Zhao Z, Dunham B M, Wise F W. Generation of 150 W average and 1 MW peak power picosecond pulses from a rod-type fiber master oscillator power amplifier[J]. J Opt Soc Am B, 2014, 31(1): 33-37.
- 5 Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, *et al.*. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power[J]. Opt Express, 2011, 19(1): 255-260.
- 6 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0101001.
- 柴 路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.
- 7 Zaouter Y, Martial I, Aubry N, *et al.*. Direct amplification of ultrashort pulses in μ -pulling-down Yb: YAG single crystal fibers [J]. Opt Lett, 2011, 36(5): 748-750.
- 8 Délen X, Zaouter Y, Martial I, *et al.*. Yb: YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources[J]. Opt Lett, 2013, 38(2): 109-111.
- 9 Zhang Zhiwei. Thin disk Yb: YAG laser and its applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(B04): 11-14.
- 张志伟. 薄片式 Yb: YAG 激光器及其应用[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(B04): 11-14.
- 10 Ding Yagian, Qi Yunfeng, Liu Yuan, *et al.*. Dual-wavelength fiber grating laser in linear overlapping cavity[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(12): 120603.
- 11 Victor Khitrov, Bryce Samson, David Machewirth, *et al.*. 242 W single-mode CW fiber laser operating at 1030 nm lasing wavelength and with 0.35 nm spectral width[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2006, WD5.
- 12 Li Wenxue, Hao Qiang, Yan Ming, *et al.*. Tunable flat-top nanosecond fiber laser oscillator and 280 W average power nanosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. Opt Express, 2009, 17(12): 10113-10118.
- 13 Zhou Cuiyun, Liu Yuan, Du Songtao, *et al.*. 1030 nm High repetition rate nanosecond pulse all fiber amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802010.
- 周翠芸, 刘 源, 杜松涛, 等. 1030 nm 高重复频率纳秒脉冲全光纤放大器[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802010.
- 14 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers at 2 μ m wavelength[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601002.
- 王 璞, 刘 江. 2.0 μ m 掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601002.
- 15 Jin Dongchen, Sun Ruoyu, Shi Hongxing, *et al.*. Stable passively Q-switched and gain-switched Yb-doped all-fiber laser based on a dual-cavity with fiber Bragg gratings [J]. Opt Express, 2013, 21(22): 26027-26033.
- 16 Stolen R H, Lin C. Self-phase-modulation in silica optical fibers [J]. Phys Rev A, 1978, 17(4): 1448.
- 17 Kelson I, Hardy A. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. J Lightwave Technol, 1999, 17(5): 891-897.

栏目编辑: 王晓球