

结构紧凑的 kHz 重复频率光纤-固体皮秒激光光源

赵明¹, 郝强¹, 郭政儒¹, 曾和平^{1,2}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 优化设计了光纤-固体皮秒激光光源中的窄光谱皮秒脉冲光纤激光振荡器及多级光纤放大器。光纤链路充分抑制了光纤中的放大自发辐射和非线性效应, 以使系统工作在低至 1 kHz 重复频率时, 仍能保持大于 20 dB 的光谱信噪比及小于 0.5 nm 的光谱带宽。采用三级双通 Nd:YVO₄ 固体放大器对该光纤链路输出的皮秒脉冲进行了放大。当系统重复频率为 1, 10, 100 kHz 时, 分别得到了 2.34, 4.30, 10.30 W 的平均功率输出, 相应的单脉冲能量分别为 2.34, 0.43, 0.10 mJ。在 Nd:YVO₄ 晶体仅为被动散热的条件下, 当系统的输出功率不超过 7 W 时, 输出光束的质量因子 $M^2 < 1.3$ 、光斑圆度大于 90%。

关键词 激光器; 光纤激光器; 固体激光器; 超短脉冲; 锁模

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401010

Compact Fiber-Solid Picosecond Laser Source with Kiloherzt Repetition Rate

Zhao Ming¹, Hao Qiang¹, Guo Zhengru¹, Zeng Heping^{1,2}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract Picosecond pulse fiber laser oscillator with narrow linewidth and multistage fiber amplifier which are used in the fiber-solid picosecond laser source are optimally designed. Spontaneous emission and nonlinear effect in the fiber are fully suppressed by fiber link, so that when the system operates at 1 kHz repetition rate, the spectral signal to noise ratio is still better than 20 dB and the spectral bandwidth is narrower than 0.5 nm. Furthermore, picosecond pulse generated from the fiber link is further amplified by a three-stage double-pass Nd:YVO₄ solid amplifier. The average output powers of the laser system are as high as 2.34, 4.30, 10.30 W, corresponding to 2.34, 0.43, 0.10 mJ single pulse energies at 1, 10, 100 kHz repetition rates. With only passively cooling on the Nd:YVO₄ crystals, beam quality M^2 is less than 1.3 and beam roundness is more than 90% when the output power of system doesn't exceed 7 W.

Key words lasers; fiber laser; solid-state laser; ultrafast pulse; mode locking

OCIS codes 140.7090; 140.3510; 140.3580; 140.3280

1 引 言

当今, 激光的应用覆盖工业、医疗、商业、科研、信息和军事等关乎国计民生的重要领域。越来越多的传统产业依靠激光加工技术来提升产品质量、提高生产效率和减少环境污染等。特别是在我国实现

由制造大国向制造强国转型的道路上, 激光制造业正在或将发挥愈加重要的作用, 成为推动中国经济发展的新引擎。在激光的众多应用中, 高精度冷加工是超快激光技术发展和应用的重要方向, 具体应用涵盖集成电路产品制造、医疗美容、显微成像和微纳加工等若干领域^[1-4]。2005 年, Klimt 等^[5]采用单

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(11404211)

作者简介: 赵明(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事超快激光技术方面的研究。E-mail: mingzhao@st.usst.edu.cn

导师简介: 郝强(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事超快激光技术方面的研究。

E-mail: qianghao@usst.edu.cn (通信联系人)

脉冲能量为 100 μJ 、重复频率为 50 kHz 的皮秒激光器在 300 μm 厚的硅晶圆上切割出直径为 2 mm 的圆孔,切割质量优异、速度快且无毛刺挂渣。Muhammad 等^[6]采用三倍频皮秒激光(脉冲宽度约为 6 ps,波长为 343 nm,平均功率范围为 7~10 W)进行了心血管支架的高精细切割,切割平整干净,避免了传统激光加工需要后续处理的问题。刘洋等^[7]采用平均功率为 2 W、重复频率为 10 kHz 的皮秒激光作为光源,对铜电极板及手机屏进行切割,切割边缘相对传统方式更平整且无毛刺。胡小豹等^[2]利用平均功率为 0.37 W、重复频率为 100 kHz 的皮秒脉冲激光器切割蓝宝石晶圆,良品率满足工业现场要求。

与目前已广泛采用的全固态激光器相比,光纤激光器具有光束质量好、电光转化效率高、激光阈值低、散热性能好和柔性可弯曲等独特优势。但是,对于高能量短脉冲激光而言(特别是 10 ps 以下的超短脉冲),较小的纤芯面积束缚了极高的光能量密度,不可避免地会产生各种非线性效应,以至于损坏光纤。

一种可行的解决方案为采用大模场棒状光纤来尽量控制脉冲在光纤放大器中的非线性效应,虽然该方案能在一定程度上解决高平均功率的问题,但当脉冲重复频率低至 10 kHz,甚至 1 kHz 时,或当脉冲能量达到 100 μJ ,甚至 1 mJ 时,增益光纤内的放大自发辐射或累积的非线性效应十分明显,从而对输出激光的时域和频域特性产生显著影响^[8-9]。此外,受高功率抽运光纤端面耦合和非线性聚焦等破坏性问题的限制,大能量脉冲的产生方面仍然没有较好的解决方案^[10]。

另一种可行的解决方案是采用时分复制技术将脉冲分离,即在时域上形成一系列子脉冲。因此,在放大过程中每个子脉冲的脉冲能量都得到了有效控制,随着子脉冲数量的增加,非线性效应的抑制效果越来越明显。但是,随着脉冲数的增加,子脉冲非线性相移的差异会导致合成效率下降。在实验方面,Kong 等^[11]采用时分复制技术在 1040 nm 波段得到了脉冲宽度为 2.2 ps、单脉冲能量为 2.5 μJ 和峰值功率为 1 MW 的激光输出。Hao 等^[12]采用分离脉冲压缩放大技术,在 1.5 μm 波段得到了单脉冲能量为 20.3 nJ、脉冲宽度为 126 fs 的激光输出。当脉冲数从 8 增加至 32 时,合成效率从 97.2% 下降至 83.3%。为了得到最佳合成效率,研究表明分离的脉冲间距需大于 2.5 倍脉冲宽度^[13]。对于该实验的 15 ps 脉冲宽度,需要几十厘米长的晶体使脉冲分离,不利于前端系统的小型化。

国内研究机构开展过相关的实验研究。但是,这些研究在同时实现窄脉冲(短至 10 ps 左右)与极低重复频率(低至 1 kHz)方面仍存在上述问题。高能量超短脉冲激光光源通常采用前端为光纤或固态激光振荡器、后端为固态激光放大器相结合的方式。2010 年,陈胜平等^[14]报道了重复频率为 59.8 MHz 的全光纤激光放大系统,最终得到输出平均功率为 30 W、脉冲宽度约为 20 ps、脉冲能量为 0.5 μJ 的激光输出。2015 年,陆云峰等^[15]报道了平均功率为 39.2 W 的光纤-固体混合放大激光系统,相应的单脉冲能量为 0.33 mJ。其中,种子源的重复频率为 120 kHz,脉冲宽度为 220 ps。为了实现低重复频率、高能量的锁模脉冲输出,付洁等^[16]在 2011 年设计了基于可饱和吸收体锁模的 Nd:YVO₄ 皮秒激光器,在 14.1 W 的抽运功率下,获得了单脉冲能量为 6.5 μJ 、重复频率为 10 kHz 和脉冲宽度为 10.4 ps 的脉冲输出。由于在锁模振荡器内采用了腔倒空技术,稳定锁模脉冲的重复频率可调范围缩小。2012 年,瞿叶玺等^[17]设计了基于偏振旋转锁模的光纤激光器,并采用低温 Yb:YAG 再生放大器,实现了 1030 nm 波段的 5.5 ps 脉冲输出,脉冲重复频率为 10 Hz,最大单脉冲能量为 0.22 mJ。2014 年,连富强等^[18]报道了基于全保偏光纤的可饱和吸收体锁模的脉冲激光振荡器及 Nd:YAG 晶体的再生放大器,38 MHz 的皮秒脉冲序列经偏硼酸钡(BBO)电光晶体选单,当系统工作在 1 kHz 重复频率时,单脉冲能量可达 1.3 mJ,脉冲宽度为 11 ps。可以看出,低至 kHz 量级的重复频率、高至 mJ 量级的皮秒脉冲光源在实现小型化、集成化方面仍存在一定的困难。

基于此,本文实现了从 1 kHz 至 10 MHz 重复频率宽范围可调的皮秒脉冲激光光源。该光源由光纤锁模脉冲激光振荡器、多级光纤预放大器和端面抽运的多级双通 Nd:YVO₄ 固体激光放大器组成。当系统工作重复频率为 1,10,100 kHz 时,分别得到了 2.34,4.30,10.30 W 的功率输出,对应的单脉冲能量分别为 2.34,0.43,0.10 mJ。激光脉冲宽度为 15 ps,光谱宽度小于 0.5 nm。

2 基本原理

为了实现光纤激光链路与固体激光链路的参数匹配,对光纤锁模脉冲振荡器及放大器在中心波长、光谱宽度和偏振态 3 个方面进行了优化设计。首先,考虑到 Nd:YVO₄ 晶体的增益带宽为 (1064.3 \pm

0.4) nm^[19], 通过控制振荡器腔内光纤光栅的中心波长来实现光纤输出与 Nd:YVO₄ 晶体的波长匹配。同时, 通过改变光纤光栅的反射带宽, 实现对振荡器输出脉冲宽度的优化; 其次, 为了防止光纤放大器的输出光谱拓展到晶体增益带宽之外, 并提高光纤放大光谱的利用效率, 通过截短关键位置的光纤长度并选用合适纤芯直径的双包层光纤来抑制非线性效应; 再次, 由于 Nd:YVO₄ 晶体仅对特定偏振方向的入射激光才有最佳放大效果, 采用全保偏光纤搭建光纤链路部分, 实现高对比度的线偏振输出。此外, 全保偏光纤具有极强的抗环境干扰能力, 有利于提高系统的长期稳定性^[20]。

激光系统的光路结构如图 1(a) 所示。光纤脉冲振荡器 (OSC) 采用驻波腔结构, 将可饱和吸收镜和光纤光栅分别作为谐振腔两端的反射镜^[21-22]。将可饱和吸收体黏附在 FC/APC 跳线端面, 使跳线输出的光经过可饱和吸收体调制后再反射回跳线中。中心波长为 976 nm 的连续抽运光经过一个 980/1064 nm 的波分复用器耦合至腔内的增益光纤上,

增益光纤采用长度为 50 cm、纤芯直径为 6 μm、数值孔径 NA 为 0.11、975 nm 处纤芯吸收率为 250 dB·m⁻¹ 的单模保偏掺镱光纤。振荡器的输出端为 FBG 的透射端。振荡器的输出脉冲通过一次单模光纤预放大过程, 并由 200 MHz 工作频率的光纤耦合声光调制器 (AOM) 进行脉冲选单, 再由双包层光纤预放大器进行能量放大。该声光调制器可实现从单脉冲 (Burst 模式) 到最高 10 MHz 的脉冲选择, 插入损耗为 2.39 dB。单模光纤预放大器采用与振荡器相同的 80 cm 增益光纤。为了获得更高的增益, 双包层光纤预放大器采用长度为 80 cm、纤芯直径为 10 μm、数值孔径 NA 为 0.08、976 nm 处包层峰值吸收率为 7.4 dB·m⁻¹ 的双包层掺镱光纤 (Yb-DCF), 对降频后的脉冲进行放大。双包层光纤在适当提高脉冲能量的同时, 能够部分抑制纤芯过小引起的非线性效应, 防止光纤放大器的输出光谱拓展到 Nd:YVO₄ 晶体增益带宽之外。M1 和 M2 为镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜的 45° 反射镜。3 个棱镜表面镀入射角为 45° 时 1064 nm 高反膜。

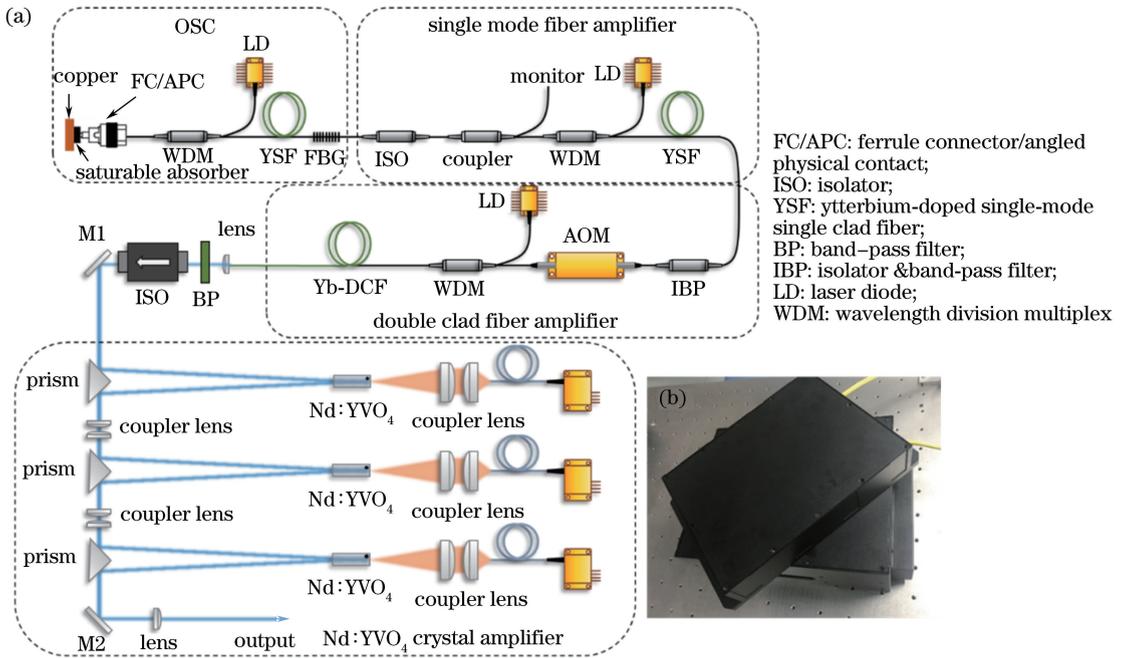


图 1 (a) 激光系统的光路结构图; (b) 激光系统样机外观

Fig. 1 (a) Diagram of optical path structure of laser system; (b) prototype of laser system

经过光纤放大后的脉冲由 FC/APC 跳线配合焦距为 8 mm 的透镜转化为空间光束。距离透镜 20 cm 处的束腰直径为 400 μm。该束腰靠近第一块 Nd:YVO₄ 晶体的抽运入射面。通过在 FC/APC 跳线与第一块 Nd:YVO₄ 晶体之间插入一个中心波长为 1064 nm、透射带宽为 2 nm 的滤波片, 可滤除

光纤放大中的自发辐射光与未被吸收的抽运光。在滤波片之后插入一个 1064 nm 隔离器, 以防止回返光进入光纤链路。实验采用 3 级双通的端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体放大结构。晶体为 a 轴切割, 掺杂浓度 (原子数分数) 为 0.4%, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 8 mm。晶体的一个端面镀有 1064 nm 高反膜和

808 nm 高透膜。该端面作为抽运光的入射面,对 808 nm 光的透射率为 97%,对 1064 nm 光的反射率为 99.8%。镀 1064 nm 高反膜是为了实现双通放大,提高放大效率。此外,为了抑制晶体放大器的自激振荡,该端面被抛光为 0.5°斜角。晶体另一个端面的镀膜为 1064 nm 和 808 nm 高透膜。三级放大器均采用输出功率为 20 W 的光纤耦合半导体激光二极管来提供抽运能量,其中心波长为 808 nm,光谱宽度为 2 nm,输出光纤的纤芯直径为 200 μm,数值孔径 NA 为 0.22。信号光与抽运光通过各自的耦合透镜聚焦在晶体内部,移动耦合透镜的位置可实现抽运光与信号光的空间匹配,以达到最佳的放大效果。

激光器整体光路紧凑,集成度高,封装后主机箱的尺寸为 35 cm×27.5 cm×12.3 cm,输出头的尺寸为 37 cm×25 cm×6 cm,如图 1(b)所示。该激光器在室温下能够实现 7×24 h 的长期稳定运转。

3 实验结果与分析

实验选取了中心波长为 1064.3 nm 的 3 种光纤光栅作为腔内滤波器件,其反射带宽分别为 0.05, 0.20, 0.60 nm,激光透射率为 40%。通过优化抽运功率可实现锁模脉冲的自启动。当光纤光栅的反射

带宽为 0.05 nm 时,振荡器的输出脉冲宽度为 190 ps,光谱宽度为 0.05 nm,如图 2(a)所示,插图为输出脉冲宽度。当光纤光栅的反射带宽分别为 0.2 nm 和 0.6 nm 时,振荡器的输出脉冲宽度分别为 30 ps 和 15 ps,对应的光谱宽度分别为 0.07 nm 和 0.30 nm,如图 2(b)、(c)所示,插图为输出脉冲宽度。激光器的重复频率设定为(20±0.5) MHz,输出功率约为 10 mW。

为了获得较高的峰值功率,后续实验选用脉冲宽度为 15 ps 的信号光进行功率放大。在 300 mW 的抽运条件下,单模光纤预放大器可将振荡器输出激光的平均功率提高至 120 mW,相应的单脉冲能量和峰值功率分别为 6 nJ 和 400 W。当声光调制器工作在 1, 10, 100 kHz 重复频率时,其尾纤的输出功率分别为 3, 30, 300 μW。在光纤放大链路中,通过优化增益光纤长度、抽运功率以及尽量缩短光纤链路的总长度,可使光纤激光链路的输出光谱较好地匹配 Nd:YVO₄ 晶体的增益带宽。当系统工作在 100, 10, 1 kHz 重复频率时,光纤链路尾端的输出功率分别为 25, 3, 0.38 mW,相应的单脉冲能量为 250, 300, 380 nJ。图 2(d)显示了光纤放大链路工作在 1 kHz~10 MHz 重复频率范围内的放大效果,信号光功率随重复频率的增加而增大。当重复

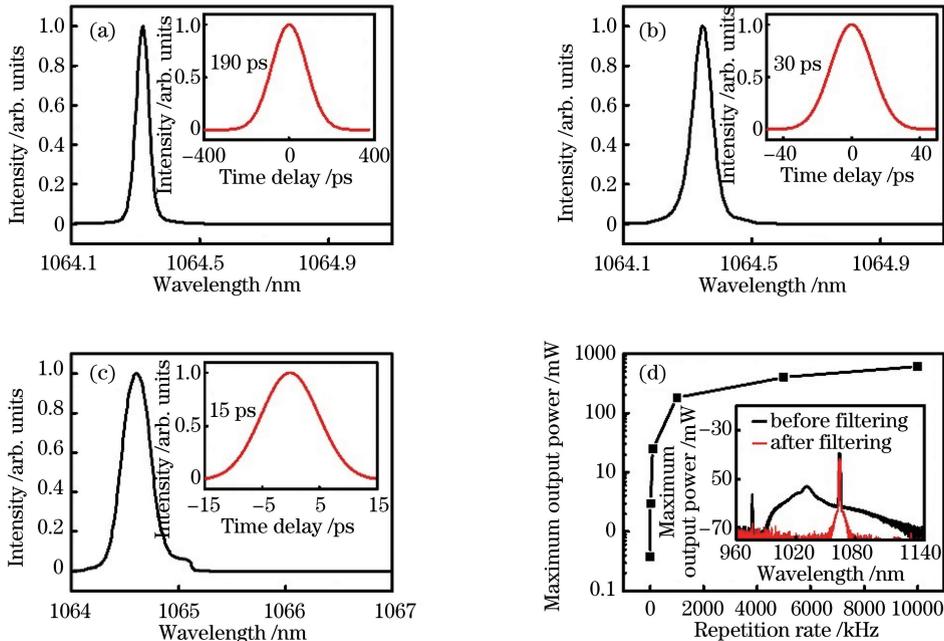


图 2 当 FBG 的反射带宽为 (a) 0.05 nm, (b) 0.2 nm, (c) 0.6 nm 时振荡器输出的光谱强度随波长的变化; (d) 光纤链路不同重复频率时的最大输出功率

Fig. 2 Variation in output spectral intensity with wavelength when reflective bandwidths of FBG are (a) 0.05 nm, (b) 0.2 nm and (c) 0.6 nm; (d) maximum output power of fiber link under different repetition rates

频率大于 1 MHz 时,增益饱和效应显现。双包层光纤预放大器输出的最高平均功率可达 600 mW,相应的重复频率为 10 MHz,单脉冲能量为 60 nJ。图 2(d)中插图光纤链路输出端滤波前后光谱对比。

图 3(a)~(c)显示了固体放大链路的放大效果。其中,图 3(a)为系统工作在 1 kHz 重复频率时,不同输入功率信号光的放大效果。三级放大器的增益系数分别为 14.6,14.0,9.2 dB,输出功率可达 2.34 W,相应的单脉冲能量为 2.34 mJ。图 3(b)、(c)显示了三级固体放大器放大 10 kHz 和 100 kHz 信号光的效果,最高输出功率分别可达 4.3 W 和 10.3 W,相应的单脉冲能量分别为 0.43 mJ 和 0.10 mJ。可以看出,当入射信号光的平均功率较低时,固体放大链路的输出功率随着入射光强的增加基

本呈线性增加;当入射信号光的平均功率较高时,固体放大链路逐步呈现出增益饱和现象。考虑到与碟片系统的结合以及系统的小型化,三级放大器足以将单脉冲能量提升到 mJ 量级,满足实验预期目标。

在固体放大链路中,当系统重复频率较高时,同样能够观察到明显的增益饱和效应。考虑到 Nd:YVO₄晶体的荧光寿命约为 100 μs,增益饱和效应出现的临界重复频率约为 10 kHz^[23]。图 3(d)为固体放大链路对不同重复频率信号光的放大效果。当注入种子脉冲的重复频率为 10 MHz 时,可得到 16.7 W 的放大激光输出,相应的单脉冲能量为 1.67 μJ。

图 4(a)为系统工作在 100 kHz 重复频率时,输出功率为 1,4,7,10.3 W 的光斑图形。当输出功率

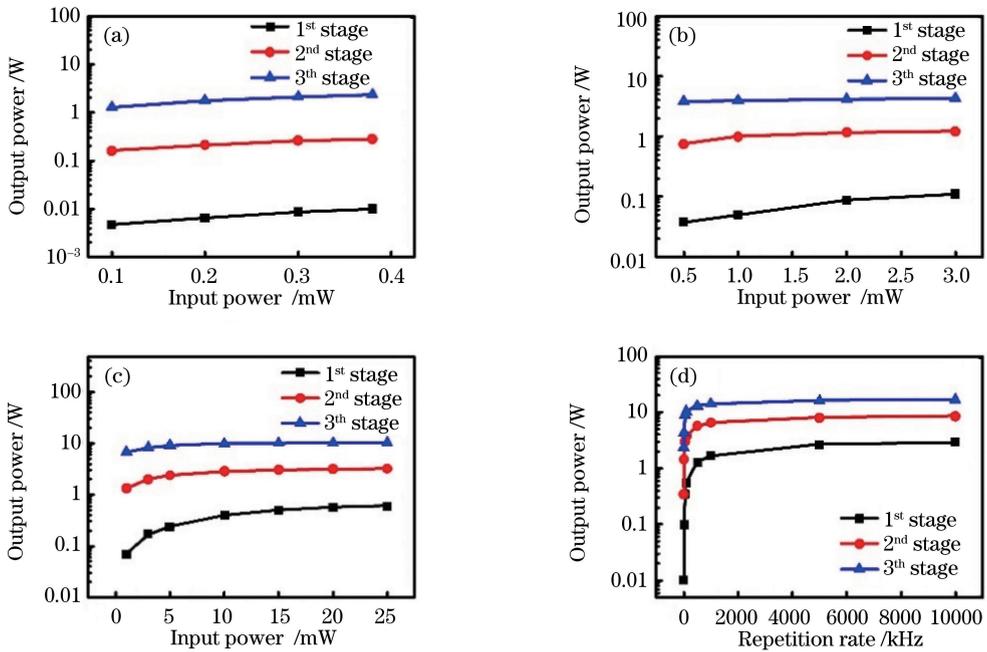


图 3 (a) 1 kHz, (b) 10 kHz 和 (c) 100 kHz 重复频率下三级固体放大器在不同功率信号光输入时的输出功率; (d) 三级固体放大器在不同重复频率时的最大输出功率

Fig. 3 Output powers of three-stage solid-state amplifier operated at (a) 1 kHz, (b) 10 kHz, and (c) 100 kHz repetition rates with different input powers; (d) maximum output powers of three-stage solid-state amplifier with different repetition rates

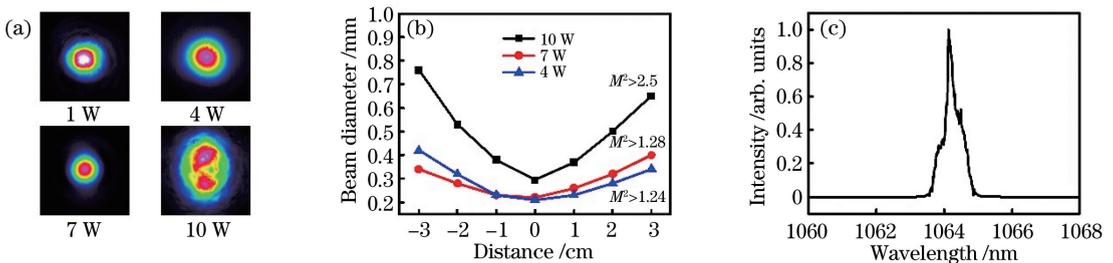


图 4 (a) 不同输出功率下的光斑图样; (b) 不同输出功率下的光束质量; (c) 输出光谱

Fig. 4 (a) Beam profiles under different output powers; (b) beam quality under different output powers; (c) output spectrum

小于 7 W 时,光斑圆度均优于 90%。当输出功率达到 10.3 W 时,光斑圆度退化为 73%。图 4(b)为 CCD 测量到的束腰附近的光束直径。当输出功率小于 7 W 时,计算得到的光束质量 M^2 小于 1.3。当输出功率超过 7 W 时,光束质量逐步恶化。当输出功率达到 10.3 W 时, M^2 退化至大于 2.5。原因在于:为了得到更好的集成度,该激光系统仅采用了被动散热方式(自然散热)。当然,通过采用主动水冷散热,可以获得更好的光束质量。图 4(c)所示为最终的激光输出光谱,1064 nm 处的光谱宽度小于 0.5 nm,在其他波段均无闲散光。

4 结 论

介绍了一种 mJ 量级单脉冲能量、在重复频率范围 1 kHz~10 MHz 内连续可调的光纤-固体皮秒激光光源。采用全保偏光纤及光纤器件搭建光纤振荡器、单模光纤预放大器和双包层光纤预放大器,提高了系统的偏振稳定性。通过优化脉冲宽度、光纤长度和抽运强度等,解决了非线性效应导致光谱展宽的问题,并抑制了低重复频率皮秒脉冲在光纤放大过程中的自发辐射。进一步采用三级双通 Nd:YVO₄ 晶体放大器将该光纤皮秒脉冲的能量提升至 mJ 量级。当系统工作在 1,10,100 kHz 重复频率时,分别得到了 2.34,4.30,10.30 W 的功率输出,对应的单脉冲能量分别为 2.34,0.43,0.10 mJ。该光源系统能够长期稳定运转,为后续高能量碟片或者板条放大器提供了前端解决方案。

参 考 文 献

- [1] Huang Y Y, Qian J, Shao C Y, *et al.* Femtosecond laser induced defects in pure silica glass with different hydroxyl concentrations[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102011.
黄媛媛, 钱静, 邵冲云, 等. 飞秒激光在不同羟基浓度纯石英玻璃内部诱导缺陷研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102011.
- [2] Hu X B, Hao Q, Guo Z R, *et al.* Dicing of sapphire wafer with all-fiber picosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102016.
胡小豹, 郝强, 郭政儒, 等. 全光纤皮秒激光切割蓝宝石晶圆的实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102016.
- [3] Luo K, Chen X Q, Peng Y, *et al.* Study of the effects of femtosecond laser peak power to silicon micro-structure[J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(5): 402-406.

罗坤, 陈向前, 彭滢, 等. 飞秒激光参数对硅表面微结构影响的研究[J]. *光学仪器*, 2016, 38(5): 402-406.

- [4] Wang L, Fan B, Wang Z S, *et al.* Dielectric optical property transformation under irradiation of ultra-short pulse laser[J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(3): 73-76.
王利, 范滨, 王占山, 等. 超短脉冲激光与介质相互作用过程中光学特性的变化[J]. *光学仪器*, 2008, 30(3): 73-76.
- [5] Klimt B H, Herrmann T. Very high repetition rate ps-laser for cost effective micro-machining[C]. *Photonic Applications Systems Technologies Conference*, 2005: PThB2.
- [6] Muhammad N, Whitehead D, Boor A, *et al.* Picosecond laser micromachining of nitinol and platinum-iridium alloy for coronary stent applications [J]. *Applied Physics A*, 2012, 106(3): 607-617.
- [7] Liu Y, Yu J, Zhang X, *et al.* Investigation and application of coaxial output three-wavelength picosecond laser micro-machining system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 051402.
刘洋, 余锦, 张雪, 等. 三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统的研制及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 051402.
- [8] Zhao Y H, Zheng Y, Zhang Y P, *et al.* The study of pulse broadening of chirped Gaussian pulses in fiber [J]. *Optoelectronic Technology*, 2006, 26(3): 177-180.
赵玉辉, 郑义, 张玉萍, 等. 啁啾高斯脉冲在光纤中传输的脉冲展宽研究[J]. *光电子技术*, 2006, 26(3): 177-180.
- [9] Lin D F. The watt level pico-second fiber laser in MOPA construction [D]. *Changsha: National University of Defense Technology*, 2008: 34-36.
林东风. 瓦级 MOPA 结构 ps 脉冲光纤激光器[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 34-36.
- [10] Wang Z W, Wang Z K, Zou F, *et al.* High-peak-power rod-type photonic crystal fiber amplifier for picosecond pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001001.
王子薇, 王兆坤, 邹峰, 等. 高功率皮秒脉冲棒状光子晶体光纤放大器[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001001.
- [11] Kong L J, Zhao L M, Lefrancois S, *et al.* Generation of megawatt peak power picosecond pulses from a divided-pulse fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 253-255.
- [12] Hao Q, Wang Y F, Liu T T, *et al.* Divided-pulse nonlinear amplification at 1.5 μm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 16290049.

- [13] Bai Y S, Chen X T, Chen J W, *et al.* Numerical study on picosecond pulse fiber amplifier based on divided-pulse amplification technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201021.
白云生, 陈旭涛, 陈家旺, 等. 时分复制技术皮秒脉冲光纤放大器数值研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201021.
- [14] Chen S P, Chen H W, Hou J, *et al.* 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 1943-1949.
陈胜平, 谌鸿伟, 侯静, 等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1943-1949.
- [15] 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.
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.
- [16] Fu J, Pang Q S, Chang L, *et al.* Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0314002.
付洁, 庞庆生, 常亮, 等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0314002.
- [17] Qu Y X, Pan X, Huang W F, *et al.* 1030 nm picosecond level optical parametric chirped pulse amplification pump [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0802003.
瞿叶玺, 潘雪, 黄文发, 等. 1030 nm 皮秒级光参量啁啾脉冲放大抽运源 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802003.
- [18] Lian F Q, Fan Z W, Bai Z A, *et al.* A Nd:YAG regenerative amplifier seeded by 1064 nm picosecond fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(13): 134207.
连富强, 樊仲维, 白振乔, 等. 基于 1064 nm 光纤皮秒种子源的 Nd:YAG 再生放大器 [J]. 物理学报, 2014, 63(13): 134207.
- [19] Zhang H J, Wang J Y, Meng X L, *et al.* Preparation and properties of vanadate series crystals [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2003, 32(5): 446-450.
张怀金, 王继扬, 孟宪林, 等. 钒酸盐系列激光晶体制备和性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2003, 32(5): 446-450.
- [20] Han F E, Tao Z D. Development and application prospect of polarization maintaining fiber [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 1990, 1: 28-32.
韩馥儿, 陶照度. 偏振保持光纤的开发及其应用前景 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1990, 1: 28-32.
- [21] Luo J, Yang S, Hao Q, *et al.* Precise locking the repetition rate of a SESAM mode-locking all polarization maintaining fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206003.
罗浆, 杨松, 郝强, 等. SESAM 锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206003.
- [22] Li P X, Wang X X, Su N, *et al.* Picosecond pulsed all-fiber Yb-doped laser with high repetition rate and wide spectrum [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201017.
李平雪, 王晓晓, 苏宁, 等. 高重复频率宽光谱皮秒脉冲全光纤掺镱激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201017.
- [23] Meng X L, Zhang H J, Zhu L, *et al.* Spectra and laser properties of Nd:YVO₄ single crystal [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1999, 28(2): 135-139.
孟宪林, 张怀金, 祝俐, 等. 掺钕钒酸钇单晶光谱与激光特性 [J]. 人工晶体学报, 1999, 28(2): 135-139.