

3.4 MW 峰值功率皮秒光纤激光系统的光谱特性

白 洋^{1,2}, 邹 峰^{1,2}, 王子薇^{1,2}, 王兆坤^{1,2}, 李秋瑞^{1*}, 漆云凤¹, 何 兵^{1,3}, 周 军^{1,3,4}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;

⁴南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

摘要 提出了基于主振荡功率放大(MOPA)结构的皮秒光纤激光系统。该系统将重复频率为 29.87 MHz 的半导体可饱和吸收镜被动锁模光纤激光器作为种子源。采用预放系统并结合声光调制器将种子源的重复频率降至 574 kHz。MOPA 结构基于棒状光子晶体光纤(PCF), 利用 PCF 大模场、高增益的特点直接对脉冲宽度为 30 ps 的脉冲进行放大, 有效抑制了自相位调制效应引起的光谱展宽。研究表明, 所提系统的 5 dB 光谱线宽与光脉冲峰值功率成比例, 该系统最终输出了近衍射极限、峰值功率为 3.4 MW 的皮秒脉冲(输出功率为 20 W 时, 光束质量因子 $M^2=1.01$), 最高平均输出功率为 21.86 W, 脉冲宽度为 11.1 ps, 中心波长为 1030.74 nm, 5 dB 光谱线宽为 1.75 nm。

关键词 激光光学; 光纤激光器; 高峰值功率; 光子晶体光纤; 自相位调制

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0501004

Spectral Properties of Picosecond Fiber Laser System with 3.4 MW Peak Power

Bai Yang^{1,2}, Zou Feng^{1,2}, Wang Ziwei^{1,2}, Wang Zhaokun^{1,2},
Li Qiurui¹, Qi Yunfeng¹, He Bing^{1,3}, Zhou Jun^{1,3,4}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China;

⁴Nanjing Zhongke Shen Guang Science & Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China

Abstract A picosecond fiber laser system based on master oscillator power amplifier (MOPA) is proposed. A passive mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) which is with repetition rate of 29.87 MHz is used as the seed source. The repetition rate can be reduced to 574 kHz when a pre-amplifier system is combined with an acousto-optic modulator (AOM). The MOPA structure is based on rod-type photonic crystal fiber (PCF). The pulse with pulse width of 30 ps can be amplified based on properties of large mode field and high gain of PCF, and the spectral expanding caused by the self-phase modulation is effectively suppressed. Results show that the spectral linewidth of 5 dB is proportional to the peak-power of optical pulse of the proposed system (the beam quality factor M^2 is 1.01 at the output power of 20 W). The peak-power of the picosecond pulse is 3.4 MW, which is near the diffraction limit. The picosecond pulse with the highest average output power of

收稿日期: 2016-12-09; 收到修改稿日期: 2017-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(U1330134, 61308024)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、江苏省科技支撑计划(BE2014001)、江苏省重点研发计划(BE2016005-4)、科技部重点专项(2016YFB0402201)

作者简介: 白 洋(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光技术方面的研究。E-mail: baiyang@siom.ac.cn

导师简介: 何 兵(1975—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器及合成技术等方面的研究。

E-mail: bryanho@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: crownsnow@163.com

21.86 W, pulse width of 11.1 ps, center wavelength of 1030.74 nm and linewidth of 1.75 nm at 5 dB can be obtained.

Key words laser optics; fiber laser; high peak power; photonic crystal fiber; self-phase modulation

OCIS codes 140.3510; 140.3538; 140.4050

1 引 言

高峰值功率皮秒激光器在非线性波长转换、微结构加工等领域有着很大的应用价值^[1-2]。近年来,随着半导体包层抽运技术的进步^[3]与新型光子晶体光纤(PCF)的出现^[4],超短脉冲光纤激光器及其放大器的性能大幅提升,在体积、散热和光束质量上相较于传统的固体激光器都有明显的优势。同时,相对于纳秒激光器,皮秒激光器具有更高的峰值功率^[5],瞬时高能密度能够激发多光子吸收,实现冷加工,避免激光线性吸收、能量扩散等影响。相比飞秒激光器,皮秒激光器避免了啁啾脉冲放大,结构相对简单,性能稳定,利于实现工业化应用^[6]。

目前锁模技术是实现皮秒激光脉冲的主要手段^[7-8],利用锁模技术可以产生较低功率的皮秒激光脉冲。一般采用主振荡功率放大(MOPA)结构实现高功率脉冲激光^[9],该结构可将皮秒种子光进行多级放大,实现高能量输出。在皮秒脉冲激光放大过程中,非线性效应主要表现为自相位调制(SPM)效应^[10-11]。光子晶体具有高纤芯包层比,相比于传统的双包层光纤,更有利于抑制 SPM 效应带来的光谱展宽等非线性效应^[12]。2007年,Zaouter等^[13]采用棒状PCF,获得了平均功率为32 W、脉冲宽度为10 ps、重复频率为3.2 MHz的激光输出,较高的激光峰值功率导致严重的光谱展宽现象,主放大级光谱半峰全宽(FWHM)达到5 nm以上。2008年,Nodop等^[14]采用棒状PCF进行放大实验,实现了峰值功率为3 MW的放大激光输出,重复频率为105 kHz,但其脉冲宽度为85 ps,仍然不能避免加工时的热效应。

目前皮秒脉冲光纤放大器的研究领域主要集中在高重复频率,在持续提高激光输出平均功率的过程中,系统的热效应与非线性效应愈发明显,且获得的单脉冲能量有限。同时,实现非线性波长变换等应用中的相位匹配要求基频光光谱宽度较窄^[15],因此需要研究和抑制高峰值功率下自相位调制效应(SPM)引起的光谱展宽。本文提出了基于MOPA结构的皮秒光纤激光系统,实验中主放大级采用棒状PCF,相比通常的双包层光纤,其掺杂浓度高、吸收效率高,因此较短光纤就可以提供足够增益,同时其更大的模场面积可以对SPM进行有效控制。采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模种子源,并经过多级预放及降频,最终获得平均功率为21.86 W、中心波长为1030.74 nm的近衍射皮秒脉冲激光输出,输出峰值功率达到3.4 MW。放大过程中SPM会引起光谱展宽,5 dB光谱线宽为1.75 nm,分析了激光器输出峰值功率与光谱线宽的变化关系。

2 实验装置

搭建的MOPA结构高峰值功率皮秒光纤激光器结构示意图如图1所示。实验装置由被动锁模光纤激

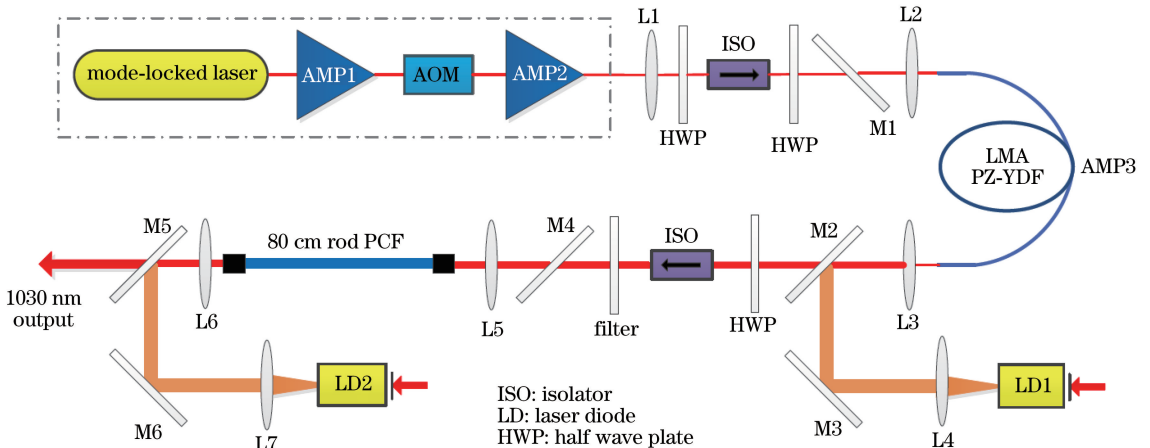


图1 高峰值功率皮秒光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of picosecond fiber laser with high peak power

光器种子源、全光纤 1 级和 2 级预放大器(AMP1、AMP2)、光纤耦合的声光调制器(AOM)降频单元、掺镱大模场保偏 PCF(LMA PZ-YDF)3 级预放大器(AMP3)和棒状 PCF 主放大器组成。

基于 SESAM 锁模技术实现的超短脉冲激光器具有系统成熟稳定、结构简单紧凑等优势,因此适合作为高功率 MOPA 放大器的种子源。本系统种子源采用基于 SESAM 的被动锁模光纤激光器(MPB 公司,加拿大),输出平均功率为 20 mW、重复频率为 29.87 MHz、脉冲宽度为 30 ps 的种子源脉冲,种子源脉冲自相关曲线如图 2(a)所示。种子源脉冲光谱图如图 2(b)所示,其中中心波长为 1030.74 nm,光谱 FWHM 为 0.11 nm。

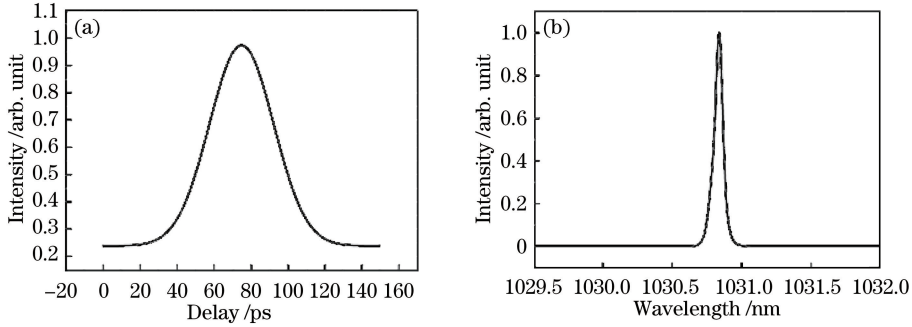


图 2 (a)种子源脉冲自相关曲线;(b)种子源脉冲光谱图

Fig. 2 (a) Autocorrelation curve of seed source pulse; (b) optical spectrum of seed source pulse

由于 AOM 的插入损耗较大(约 3 dB),且种子源脉冲经过降频后的光信号平均功率较低,所以实验中将光信号先经过 1 级预放大(AMP1)获得一定功率,再将光信号通过 AOM 选单降频至 574 kHz 后送入 2 级放大(AMP2)。同时,AOM 提供的信噪比大于 40 dB,抑制了脉冲间的放大自发辐射(ASE)。测得的种子源脉冲在 AOM 降频前后的脉冲序列如图 3 所示。

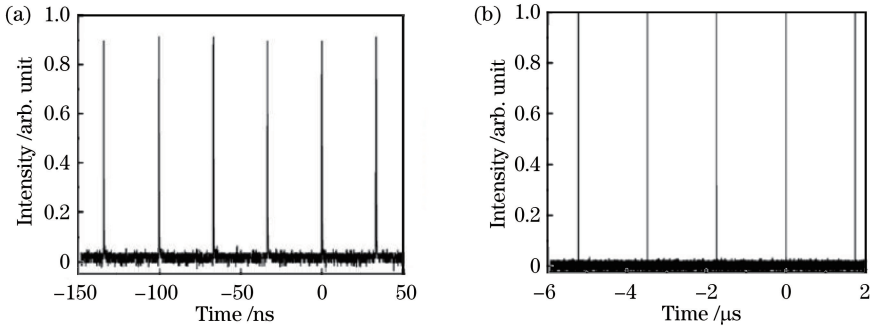


图 3 (a) 30 MHz 重复频率下的输出脉冲序列;(b) 574 kHz 重复频率下的输出脉冲序列

Fig. 3 (a) Output pulse sequence with repetition rate of 30 MHz; (b) output pulse sequence with repetition rate of 574 kHz

AMP1 采用长度为 3.5 m 的双包层掺镱光纤(型号 LMA-YDF 10/125-M, Nufern 公司, 美国), 在 976 nm 处吸收系数为 4.95 dB/m。AMP2 采用长度为 0.9 m 的双包层掺镱光纤(型号 DCF-YB-15/128P-FA, Coractive 公司, 美国), 在 976 nm 处吸收系数为 15 dB/m。相比于传统的双包层光纤, PCF 模场面积大, 有利于提高峰值功率, 并能有效抑制 SPM 等的非线性效应^[16], 并且 PCF 的微结构设计可以有效地进行模式控制, 以获得近衍射极限输出。第 3 级预放大(AMP3)采用长度为 2 m 的大模场、单模、双包层掺镱保偏光纤(型号 DC-200/40-PZ-Yb, NKT Photonics 公司, 美国), 光纤模场面积为 $700 \mu\text{m}^2$, 纤芯数值孔径为 0.03, 增益纤盘绕直径为 35 cm, 尾纤放置于长度为 20 cm 的 V 型铜槽夹持, 铜槽置于五轴调整架上。对输出端面进行 6° 切割, 以抑制端面反射。实验中将光纤快慢轴置于同一水平面上, 以避免激光偏振度的退化。非球面透镜 L1($F_1 = 35 \text{ mm}$)、L2($F_2 = 100 \text{ mm}$)将信号光准直耦合进入 AMP3。空间光隔离器(ISO)可以获得线偏振光(偏振抑制比大于 15 dB), 并避免激光放大过程中产生自激振荡。

主放大级采用棒状 PCF(型号 aeroGAIN-ROD-PM85, NKT photonics 公司, 美国)。光纤在 976 nm 波段处的吸收系数为 18.75 dB/m, 模场直径为 $65 \mu\text{m}$, 纤芯数值孔径为 0.02, 光纤长度为 0.8 m。采用单个 60 W 半导体激光器(LD2)后向抽运 PCF, 并将光纤放置于加装水冷系统的铝块上进行散热。光纤两端加装

端帽并镀 1030 nm 增透膜,可避免高功率激光损坏端面并抑制反射。为了滤除前级 ASE 以提高激光信噪比,在主放大级之前加入通光波段为 (1030 ± 5) nm 的滤波片。非球面透镜 L3($F_3 = 36$ mm)、L5($F_5 = 72$ mm)将信号光准直耦合进入棒状 PCF。系统中所有镜片对偏振不敏感,镜片高度与激光高度持平。半波片(HWP)用来调节偏振度。双色镜 M1、M4 对 976 nm 高反射,用来滤除前级的残余抽运光。

3 实验结果和分析

采用 5 dB 标注光谱线宽,防止 SPM 感应光谱展宽引起的波浪式多峰振荡结构对数据分析产生影响。

3.1 预放级输出结果

使用 2 W 的 976 nm 抽运光进行抽运,AMP1 的激光输出功率为 200 mW,对应脉冲能量为 6.7 nJ。种子光经过 AMP1 后通过 AOM 选单降频,脉冲重复频率从 29.87 MHz 选单降频到 574 kHz,经过 AOM 后的激光平均输出功率为 1.6 mW。利用 AMP2 对信号光进行放大。由于 AMP2 所用光纤纤芯较细,SPM 效应导致光谱展宽明显,最终选择的激光平均输出功率为 14.2 mW,光谱半峰全宽为 0.28 nm,输出脉冲能量为 24.7 nJ。

图 4(a)为 AMP3 抽运功率与平均输出功率的关系,为了抑制前级光谱展宽,注入弱信号光,放大器尚未进入线性放大区域。峰值功率在 AMP3 中迅速升高,受 SPM 效应的影响,输出光谱明显展宽。输出光谱分裂为两个尖峰,为了准确表征分裂后的光谱宽度,记录 5 dB 光谱线宽。图 4(b)为 AMP3 平均输出功率与 5 dB 光谱线宽的关系,可见随着输出激光平均功率的升高,输出激光的 5 dB 光谱线宽也随之增加,两者几乎呈线性关系。在最高 680 mW 的平均输出功率下,5 dB 光谱线宽的展宽为 0.529 nm。为了控制 SPM 带来的展宽,将激光平均输出功率保持在 338 mW 进行实验。此时用自相关仪测量得到的输出脉冲如图 4(c)所示,所用放大级光纤的正色散导致脉冲宽度略微展宽至 30.5 ps。图 4(d)为平均输出功率为 338 mW 时的光谱,此时输出激光的 5 dB 光谱线宽为 0.47 nm。

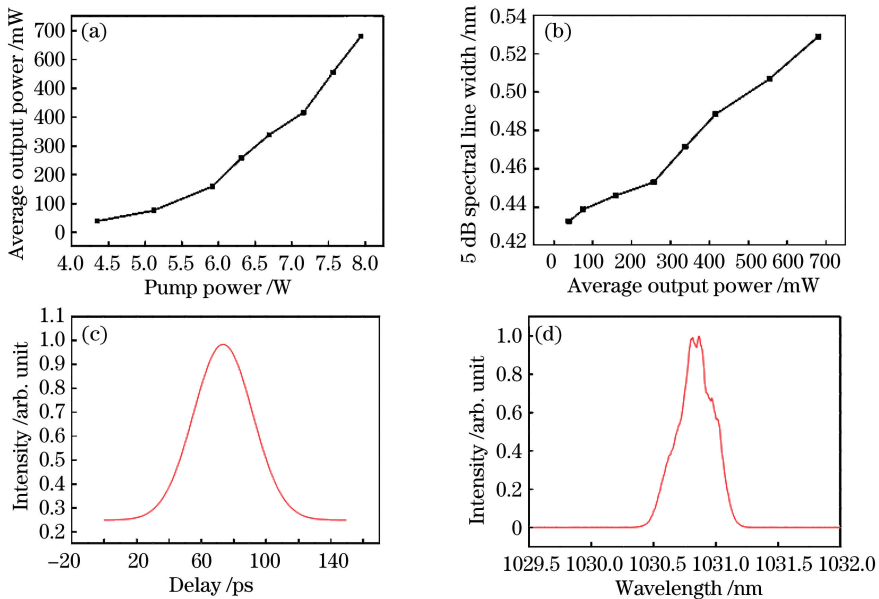


图 4 (a)平均输出功率随抽运功率的变化;(b) 5 dB 光谱线宽随平均输出功率的变化;

(c)平均输出功率为 338 mW 时脉冲的自相关曲线;(d)平均输出功率为 338 mW 时的光谱

Fig. 4 (a) Variation in average output power with pump power; (b) variation in 5 dB spectral width with average output power; (c) autocorrelation curve when average output power is 338 mW; (d) optical spectrum when average output power is 338 mW

3.2 主放大级输出结果

研究 AMP3 输出功率为 338 mW 时主放大级的放大特性。图 5(a)为主放大级平均输出功率随抽运功率的变化。当抽运功率达到 60.1 W 时,可获得 21.86 W 的激光输出,此时抽运光漏光 18.31 W,光-光转换

效率为 52.3%。从曲线变化可以看出,当抽运功率提高到约 40 W 时,激光输出功率的增长趋势略微变快。原因是随着抽运电流的增大,半导体激光器抽运源输出的抽运光波长发生红移,导致棒状增益光纤吸收效率增加,因此光-光转换效率也随之增加。

利用自相关仪测量不同输出功率下的脉冲宽度(采用高斯拟合)。随着输出功率的升高,输出脉冲宽度由 30 ps 逐渐被压缩至 11.1 ps,最高输出峰值功率为 3.4 MW。随着峰值功率的提高,SPM 导致光谱明显展宽,图 5(b)为 5 dB 光谱线宽随输出激光峰值功率的变化,图中斜线为计算数据的拟合,输出激光峰值功率与输出激光 5 dB 光谱线宽呈线性关系。

图 5(c)为主放大级中平均输出功率分别为 3.7,6.5,15,20,21.86 W 时的输出光谱,对应的 5 dB 光谱线宽分别为 0.67,0.84,1.01,1.41,1.75 nm,插图为平均输出功率为 21.86 W 时的脉冲自相关轨迹,其脉冲宽度为 11.1 ps,图 5(d)为 20 W 平均输出功率下的光束质量因子 M^2 。

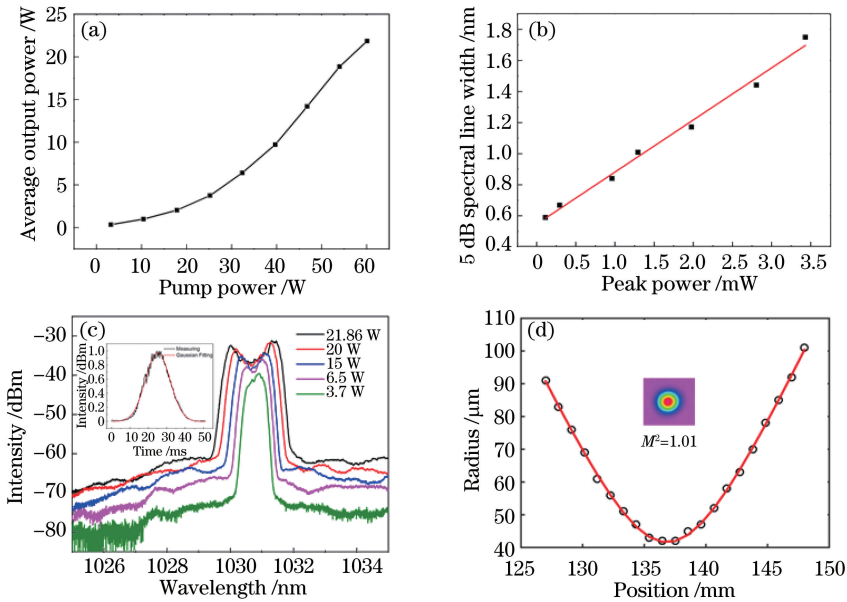


图 5 (a)主放大级平均输出功率随抽运功率的变化;(b) 5 dB 光谱线宽随输出激光峰值功率的变化;(c)不同平均输出功率下的输出光谱(插图为 21.86 W 平均输出功率下的自相关轨迹);(d) 20 W 平均输出功率下测量的光束质量因子 M^2

Fig. 5 (a) Variation in average output power of master amplifier with pump power; (b) variation in 5 dB spectrum line width with peak value of output laser; (c) output spectra under different average output powers (inset is autocorrelation curve when average output power is 21.86 W); (d) beam quality factor M^2 when average output power is 20 W

相比激光平均输出功率为 3.7 W 的情况,平均输出功率为 6.5 W 时 SPM 引起的新频率成分沿中心波长 1030.74 nm 对称向短波长与长波方向延伸,新的频率成分相对于中心波长的对称关系主要由预放大级输出的脉冲结构决定,此时,主放大级处在小信号增益状态下。随着输出脉冲激光强度的增加,SPM 效应增强,频谱继续展宽,当激光平均输出功率为 15 W 时,中心波长两侧出现明显的光谱振荡,光谱呈现双峰结构。由表 1 可以看出,当平均输出功率为 6.5 W 时,相对中心波长红移峰的延伸距离 $\Delta\lambda_1$ 大于蓝移峰的延伸距离 $\Delta\lambda_2$,两峰中心波长的平移距离比为 1.162;平均输出功率分别为 15,20,21.86 W 时,两峰中心波长的平移距离比小于 1。

表 1 光谱双峰相对中心波长的平移距离比

Table 1 Rates of spectral shift distances of two peaks from central wavelength

| Output laser power / W | Spectral wavelengths of two peaks / nm | $\Delta\lambda_1 / \Delta\lambda_2$ |
|------------------------|--|-------------------------------------|
| 6.5 | 1030.52, 1030.99 | 1.162 |
| 15 | 1030.31, 1031.07 | 0.775 |
| 20 | 1030.19, 1031.27 | 0.964 |
| 21.86 | 1030.01, 1031.35 | 0.832 |

分别对比平均输出功率为 6.5, 15, 20, 21.86 W 时, 光谱红移峰值功率与蓝移峰值功率的相对强度之比, 光谱呈现两个峰, 且右峰相比左峰的增益更高, 即光谱红移峰值功率 σ_1 与光谱蓝移峰值功率 σ_2 之比大于 1, 光谱双峰峰值强度如表 2 所示。出现这种现象的原因可能是不同增益过程导致脉冲形状发生变化。当抽运功率较低时, 主放大级处于小信号增益状态, 光谱成分得到展宽, 脉冲包络内的不同时刻有着不同的瞬时频率, 但由于各频率增益保持一致, 脉冲形状仍然保持对称结构。随着抽运功率的增加, SPM 引起的频率啁啾量增加, 使脉冲包络内不同时刻的瞬时频率不同, 脉冲不同部位因增益的不同导致的脉冲放大不均匀。同时, 在正色散系统中, 长波长比短波长的传播速度更快, 对应脉冲前沿, 而脉冲前沿有着更高的增益。SPM 引起的啁啾、脉冲本身特性及增益变化的共同作用使 SPM 引起的光谱呈现出不同的特性。

表 2 光谱双峰峰值强度

Table 2 Spectral peak intensity of two peaks

| Average output power /W | Spectral peak intensity /dBm | σ_1/σ_2 |
|-------------------------|------------------------------|---------------------|
| 6.5 | -37.824, -35.786 | 1.057 |
| 15 | -35.225, -34.393 | 1.024 |
| 20 | -33.248, -31.607 | 1.052 |
| 21.86 | -32.523, -31.179 | 1.043 |

激光平均输出功率为 21.86 W 时, 其光谱信噪比超过 30 dB。当平均输出功率为 20 W 时, 采用商用光束质量分析仪(型号 LQM-HP PRIMES)测得光束质量因子 M^2 为 1.01, 如图 5(d)所示。当平均输出功率为 21.86 W 时, 测得偏振度为 21 dB。为防止峰值功率接近于光纤的固有损伤阈值, 损坏光纤端面, 不再增加激光输出功率^[17]。

SPM 使超短脉冲的频谱展宽^[18], 主要原因是折射率随光强变化导致的非线性相移随时间产生变化, 但脉冲的形状保持不变^[10]。对于非啁啾脉冲, 频谱展宽量一般可表示为^[19]

$$\Delta\lambda_{\text{SPM}} \propto \frac{P_{\text{peak}} \times L_{\text{eff}}}{\Delta\tau \times A_{\text{eff}}} \propto \frac{P \times L_{\text{eff}}}{(\Delta\tau)^2 \times R \times A_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

其中

$$L_{\text{eff}} = [\exp(gL) - 1]/g, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_{\text{SPM}}$ 为光谱展宽量, P_{peak} 为激光峰值功率, $\Delta\tau$ 为脉冲持续时间, L_{eff} 为有效光纤长度, L 为光纤长度, A_{eff} 为有效模场面积, R 为激光重复频率, P 为激光平均输出功率, g 为光纤增益。有效光纤长度与有效模场面积在该实验中为定值。

由(1)式可知, 在非啁啾脉冲情况下, 由 SPM 效应引起的 5 dB 光谱线宽展宽量与平均输出功率和脉冲宽度平方的比值成正比。假定输出脉冲为非啁啾脉冲, 图 6 为实验中 5 dB 光谱线宽展宽量与平均输出功率和脉冲宽度平方的比值的实验结果。经拟合, 实验结果与理论结果吻合, 两者成正比。

同时, 由(2)式可知, 5 dB 光谱线宽展宽量 $\Delta\lambda_{\text{SPM}}$ 与有效光纤长度 L_{eff} 成正比, 与有效模场面积 A_{eff} 成反比。PCF 具有大模场面积、单位长度高增益的优点, 相比传统光纤可以有效抑制放大过程中自相位调制效应引起的光谱展宽。

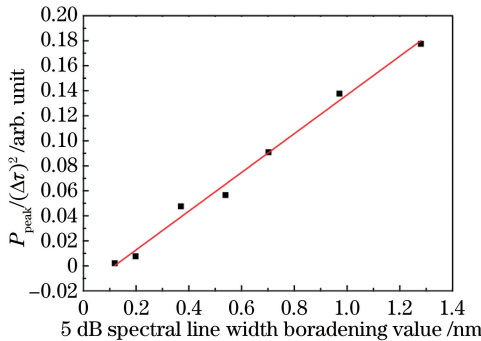


图 6 主放大级下 5 dB 光谱线宽展宽量与平均输出功率与脉冲宽度平方之比的关系

Fig. 6 Relationship between 5 dB spectral line width broadening value with ratio of average output power to square of pulse width

4 结 论

报道了 574 kHz、3.4 MW 高峰值功率的皮秒光纤激光系统,其最高平均输出功率为 21.86 W,中心波长为 1030.74 nm,偏振消光比为 21 dB。实验利用基于 SESAM 的被动锁模光纤激光器,主放大级采用棒状 PCF,利用 PCF 大模场面积、单位长度高增益的优点,可以有效抑制高峰值功率超短脉冲放大中的非线性效应,直接将脉冲宽度为 30 ps 的脉冲放大到 3.4 MW 峰值功率,并获得了 M^2 为 1.01 的近衍射极限输出。所提系统的 5 dB 光谱线宽为 1.75 nm,经分析得出光脉冲峰值功率与 5 dB 光谱线宽呈正比例关系。整个系统输出激光峰值功率高,激光信噪比超过 30 dB,对激光产品加工及非线性变换领域的应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Bloembergen N, Pershan P S. Light waves at the boundary of nonlinear media[J]. Physical Review, 1962, 128(2): 606-622.
- [2] Su Yongsheng, Li Liang, He Ning, *et al.* Experiment of micro-structures on the surface of polycrystalline diamond[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803004.
苏永生, 李 亮, 何 宁, 等. 聚晶金刚石表面微结构的激光加工实验[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803004.
- [3] Zhou B, Kane T J, Dixon G J, *et al.* Efficient, frequency-stable laser-diode-pumped Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 1985, 10(2): 62-64.
- [4] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.
- [5] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, *et al.* Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
- [6] Pronko P P, Dutta S K, Du D, *et al.* Thermophysical effects in laser processing of materials with picosecond and femtosecond pulses[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(10): 6233-6240.
- [7] Zhu Ruogu. Laser application technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 112-178.
朱若谷. 激光应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 112-178.
- [8] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, *et al.* Self-starting, passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation[J]. Electronics Letters, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [9] Limpert J, Liem A, Reich M, *et al.* Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. Optics Express, 2004, 12(7): 1313-1319.
- [10] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 1995.
- [11] Chang Liping, Fan Wei, Guo Shuqin. Experimental study on self-phase modulation in hundred-picosecond pulse amplification[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(8): 1181-1185.
常丽萍, 范 薇, 郭淑琴. 百皮秒脉冲放大中自相位调制效应实验研究[J]. 光子学报, 2011, 40(8): 1181-1185.
- [12] Wang Ziwei, Wang Zhaokun, Zou Feng, *et al.* High-peak-power rod-type photonic crystal fiber amplifier for picosecond pulses[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(10): 1001001.
王子薇, 王兆坤, 邹 峰, 等. 高峰值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.
- [13] Zaouter Y, Cormier E, Rigail P, *et al.* 30 W, 10 μ J, 10-ps SPM-induced spectrally compressed pulse generation in a low non-linearity ytterbium-doped rod-type fibre amplifier[C]. SPIE, 2007, 6453: 64530O.
- [14] Nodop D, Schmidt O, Limpert J, *et al.* 105 kHz, 85 ps, 3 MW microchip laser fiber amplifier system for micro-machining applications[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2008: CThL1.
- [15] Zhang Xin, Zhang Hengli, Mao Yefei, *et al.* Efficient methods of green output by second harmonic generation with short pulse broad-band laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0202003.
张 新, 张恒利, 毛叶飞, 等. 高效短脉冲宽带倍频绿光实现方法[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202003.
- [16] Saby J, Cocquelin B, Meunier A, *et al.* High average and peak power pulsed fiber lasers at 1030 nm, 515 nm, and 343 nm[C]. SPIE, 2010, 7580: 75800I.
- [17] Saraceno C J, Heckl O H, Baer C R E, *et al.* Pulse compression of a high-power thin disk laser using rod-type fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1395-1407.
- [18] Xu Xin, Hu Xiaohong, Feng Ye, *et al.* Spatiotemporal evolution of the light field inside the microresonator with normal dispersion[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0619001.

徐 昕, 胡晓鸿, 冯 野, 等. 正色散光学微腔中光场演化过程研究[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0619001.

[19] Chang Liping. Research on amplification behavior and nonlinear phenomenon of the ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.

常丽萍. 掺镱双包层光纤放大器放大特性及其非线性现象研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008.