

激光与光电子学进展

1560 nm 飞秒激光分离脉冲非线性放大压缩技术研究

张静^{1,2*}, 程林^{1,2}, 罗传仙^{1,2}, 江翼^{1,2}, 石悠旖^{1,2}¹南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211006;²国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074

摘要 介绍了一种基于分离脉冲的掺铒光纤飞秒激光放大技术及光源装置。该光源采用分离脉冲放大技术将待放大种子脉冲先通过偏振复用方式分割成若干个子脉冲,再由光纤主放大器非线性放大和压缩,从而免去了光栅对或者棱镜对的使用。1.55 μm 波段分离脉冲放大技术的特点在于不仅可以有效降低飞秒脉冲放大过程中的光谱非线性畸变,实现无基底的时域脉冲输出,而且可以通过管理泵浦光强度和光纤长度对非线性效应和光谱展宽程度进行精细控制。实验上,研究了主放大器在低非线性条件和高非线性条件下的脉冲放大和压缩效果。其中,在低非线性条件下,主放大器直接输出脉冲宽度 830 fs、平均功率 3 W 的激光,相应峰值功率为 36.1 kW;在高非线性条件下,主放大器直接输出脉冲宽度 137 fs、平均功率 1.54 W 的激光,相应峰值功率为 112 kW。通过周期极化铌酸锂晶体光学倍频验证了 1560 nm 飞秒脉冲的对比度,倍频效率最高可达 40.3%。

关键词 激光技术; 激光放大器; 掺铒光纤; 非线性光纤光学; 锁模激光器

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914001

Nonlinear Amplification and Compression of Femtosecond Laser at 1560 nm via Divided-Pulse Technology

Zhang Jing^{1,2*}, Cheng Lin^{1,2}, Luo Chuanxian^{1,2}, Jiang Yi^{1,2}, Shi Youyi^{1,2}¹NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing, Jiangsu 211006, China;²Wuhan NARI Co. Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In this study, an erbium-doped fiber femtosecond laser source based on divided-pulse amplification is introduced. Using a master-oscillator power-amplifier configuration, the seed pulse is first enhanced by a fiber preamplifier. Then, the preamplified pulse is divided into 64 replicas in sequence pulse dividers using polarization multiplexing. Finally, the seed pulse is simultaneously amplified and compressed in the main amplifier. A unique characteristic of divided-pulse amplification at 1.55 μm is that it can effectively reduce the nonlinearity-induced spectral distortion in the femtosecond pulse-amplification process for achieving pedestal-free pulse and finely control the nonlinear effect and managing the pump light intensity and fiber length in the spectrum-broadening process. In the pulse-amplification process, the pulse width could be compressed by the negative dispersion of fiber, thus, avoiding the use of grating or prism pairs. In the experiment, the low-nonlinearity and high-nonlinearity regions are investigated for the main amplifier. In the low-nonlinearity region, the amplified pulse achieves an average power of as high as 3 W with 830 fs pulse duration and 36.1 kW peak power. However, in the high-nonlinearity region, the

收稿日期: 2020-12-10; 修回日期: 2021-01-18; 录用日期: 2021-02-01

基金项目: 国网电力科学研究院有限公司(524625180044)

通信作者: *275256470@qq.com

amplified pulse achieves a pulse duration of as short as 137 fs with 1.54 W average power and 112 kW peak power. Furthermore, the contrast of 1560 nm femtosecond pulse is verified through optical frequency doubling in a periodically poled lithium niobate crystal. The optimized frequency doubling efficiency reaches up to 40.3%.

Key words laser optics; laser amplifiers; erbium-doped fiber; nonlinear fiber optics; mode-locked lasers

OCIS codes 140.3280; 060.2410; 060.4370; 140.4050

1 引言

飞秒激光已广泛应用于泵浦探测分析、太赫兹物理、生物光子学、精密光谱测量、微纳加工等领域^[1-7]。近十年,随着光纤及光纤器件的逐步成熟,新应用需求的不断涌现,光纤飞秒激光的关键技术和光源系统发展迅速。光纤飞秒激光器可实现旋转钥匙启动、被动或风冷散热,具有长期稳定可靠、免维护的显著优势。特别是,掺铒光纤飞秒激光经非线性晶体倍频后可实现 780 nm 波段输出,已成为钛宝石飞秒激光器的竞争者。

通常,光纤锁模振荡器的输出功率有限,仅为毫瓦量级,必须经过功率放大后才能满足更多的应用需求。目前,脉冲激光系统大多采用主振荡功率放大结构,飞秒脉冲放大器通常采用啁啾脉冲放大(CPA)技术^[8-9]。CPA 技术是将锁模振荡器的输出脉冲在展宽器中进行时域展宽,随后在功率放大器中进行能量提升,最后在脉冲压缩器中进行时域压缩。因此,CPA 技术是通过在时域上拉伸脉冲显著降低峰值功率,从而在光纤放大器中抑制脉冲的非线性效应并避免光致损伤。为了兼顾小型化、高稳定性、高可靠性等设计概念,1.5 μm 波段的 CPA 系统通常采用光纤结构,以数十米甚至上百米的单模光纤或色散补偿光纤对种子脉冲进行时域展宽,脉冲压缩器为光栅对或者棱镜对。由于光纤链路较长,非线性、色散、增益的综合管理成为设计高功率或高能量飞秒光纤激光器关键因素。2014 年,Dai 等^[10]采用碳纳米管锁模的振荡器,通过 37 m 色散补偿光纤及两级掺铒光纤放大器获得了平均功率 3.4 W、重复频率 75 MHz 的脉冲输出,由光栅对去啁啾后脉冲宽为 765 fs,相应峰值功率为 31 kW,脉冲压缩效率为 52.9%。同年,Sobon 等^[11]采用 145 m 长度的展宽光纤及三级光纤放大器,获得了平均功率 16.25 W、重复频率 50 MHz 的脉冲输出,由光栅对去啁啾后脉冲宽为 835 fs,相应峰值功率为 207 kW,脉冲压缩效率为 53%。2020 年,Wei 等^[12]尝试了多种不同色散参数的色散补偿光纤,最终获得了脉冲宽度 344 fs、平均功率 1.02 W、中心波

长 1560 nm 的脉冲输出。因此,在 CPA 光纤放大器中,增益介质的有限带宽、较长光纤链路累计的高阶色散和高阶非线性成为阻碍脉冲宽度压缩至百飞秒左右的主要因素。

近几年,分离脉冲放大技术(DPA)在激光功率或能量放大方面获得了极大发展。DPA 技术是将种子脉冲先通过双折射晶体或者偏振分束延迟线进行偏振复用形成若干个偏振依次正交的子脉冲,从而实现对种子脉冲的能量分割。所形成的子脉冲数目与偏振分束的次数成 2^n 关系,其中, n 为双折射晶体或者偏振分束延迟线的个数之和。比如 3 块双折射晶体依次进行偏振复用,即可形成 8 个子脉冲^[13-16]。DPA 技术已成功应用于 1.0 μm 波段,能够实现百毫焦量级脉冲的输出^[17-20]。通常,1.0 μm 波段 CPA 和 DPA 的展宽或压缩通常为空间光路结构。区别于 1.0 μm 波段,1.5 μm 波段可通过正、负色散光纤管理脉冲啁啾,从而使脉冲在主放大器中进行能量提升的同时实现脉冲压缩,免去了光栅对或者棱镜对的使用,有望改善飞秒激光器的稳定性和可靠性。本实验采用 DPA 技术,通过 64 脉冲分离,有效降低了光纤放大器的非线性,最终获得重复频率 100 MHz、平均功率 1.54 W、脉冲宽度 137 fs 的脉冲输出,1560 nm 脉冲的倍频效率高达 40.3%。

2 数值模拟

为了有效控制掺铒光纤功率放大器中的非线性效应,首先采用分步傅里叶方法求解广义非线性薛定谔方程,对脉冲在光纤放大器中演化过程进行数值模拟。

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\alpha}{2} A + \sum_{n \geq 2} \frac{i^{n+1}}{n!} \beta_n \frac{\partial^n A}{\partial T^n} + i\gamma A \int_{-\infty}^{+\infty} R(T') |A(z, T - T')|^2 dT', \quad (1)$$

式中: $A=A(z, t)$ 为脉冲包络的复振幅; α 为增益系数; β_n 为中心频率 ω_0 处的色散系数; γ 为非线性系数。研究发现,通过控制有源光纤的增益系数和光纤长度可以有效管理脉冲放大过程中的非线性效应。数值模拟过程中,我们选取增益光纤的非线

性系数为 $3.0 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 中心波长 1560 nm 处的色散系数 $\beta_2 = 22 \text{ fs}^2/\text{mm}$ 。入射正啁啾脉冲的脉冲宽度为 1.91 ps、光谱宽度为 17.9 nm、脉冲能量为 60 pJ。图 1(a) 所示为当非线性系数 γ 和增益系数 α 确定时, 脉冲宽度在增益光纤中的演化进程。假设光纤的非线性系数 γ 和增益系数 α 均为零, 即同时忽略非线性效应和功率放大效果, 则入射脉冲由光纤负色散进行脉冲压缩。在光纤长度为 6.25 m 处时, 脉冲宽度达到变换极限脉宽 200 fs, 与脉冲的傅里叶变换极限脉宽一致。当非线性系数 $\gamma = 3$ 、增益系数 $\alpha = 0$ 时, 相当于放大器尚未开启, 入射脉冲在增益光纤中仅表现微弱的非线性, 光谱略微展宽。由增益光纤进行色散补偿后, 在光纤长度为 6.08 m 附近得到的最短脉冲宽度为 163 fs。当非

线性系数 $\gamma = 3$ 、增益系数 $\alpha = 2$ 时, 5.0 m 长度增益光纤提供了 10 dB 的增益, 脉冲能量从 0.06 nJ 放大至 0.6 nJ。由于脉冲能量的逐步增加, 入射脉冲在 3.0 m 附近出现非线性效应, 光谱开始逐渐变宽, 脉冲在色散负光纤的压缩下显著变窄。当光纤长度约为 5.16 m 时, 所能获得的最短脉冲宽度为 60 fs。当非线性系数 $\gamma = 3$ 、增益系数 $\alpha = 4$ 时, 4.0 m 长度增益光纤提供了 16.0 dB 的增益, 脉冲能量从 0.06 nJ 放大至 2.4 nJ。入射脉冲提前至 2.5 m 光纤长度处表现出非线性效应。当光纤长度约为 3.96 m 时, 所能获得的最短脉冲宽度为 38 fs。当光纤长度超过 4.0 m 时, 尽管脉冲峰值可以维持在 30 fs 附近, 但脉冲表现出明显的基底, 能量并不集中于主脉冲内。

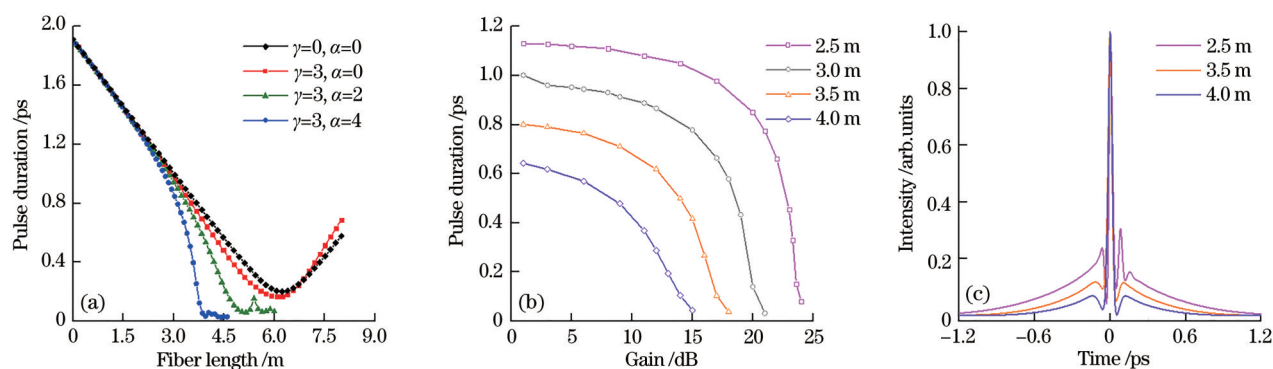


图 1 脉冲在光纤主放大器中的演化过程。(a) 当 $\gamma=0$ 和 $\alpha=0$ 、 $\gamma=3$ 和 $\alpha=0$ 、 $\gamma=3$ 和 $\alpha=2$ 、 $\gamma=3$ 和 $\alpha=4$, 脉冲宽度随光纤长度的变化情况; (b) 当光纤长度分别为 2.5 m、3.0 m、3.5 m 和 4.0 m 时, 脉冲宽度随光纤放大器增益系数的变化情况; (c) 当光纤长度 (增益) 分别为 2.5 m (24 dB)、3.5 m (18 dB) 和 4.0 m (15 dB), 增益为 15 dB 时, 脉冲宽度随光纤放大器增益系数的变化情况

Fig. 1 Evolution of pulse in optical fiber main amplifier. (a) When $\gamma=0$ and $\alpha=0$, $\gamma=3$ and $\alpha=0$, $\gamma=3$ and $\alpha=2$, and $\gamma=3$ and $\alpha=4$, pulse width changes with fiber length; (b) when fiber length is 2.5 m, 3.0 m, 3.5 m, and 4.0 m, pulse width changes with gain coefficient of fiber amplifier; (c) when fiber length (gain) is 2.5 m (24 dB), 3.5 m (18 dB), and 4.0 m (15 dB), the gain is 15 dB, pulse width changes with gain coefficient of fiber amplifier

如图 1(b) 所示, 当光纤长度 L 确定时, 脉冲宽度随着增益系数的变化情况。当光纤长度为 2.5 m 时, 增益系数在 1~16 dB 区间内, 即低非线性条件, 脉冲压缩较为缓慢, 从 1.12 ps 压缩至约 1.0 ps; 当增益系数从 16 dB 增加至 24 dB, 即高非线性条件时, 脉冲压缩较为强烈, 从 1.0 ps 可压缩至 45 fs。当光纤长度从 2.5 m 逐次增加至 4.0 m 时, 总增益脉冲均为 1 dB, 脉冲宽度从 1.12 ps 压缩至 0.64 ps。当光纤长度为 4.0 m、增益系数为 15 dB 时, 由于非线性致光谱展宽和光纤负色散的补偿作用, 脉冲宽度达到约 40 fs。同时, 从图 1(b) 中可以看出, 不管所用放大器的光纤长度如何, 都能实现短至 100 fs

以下的脉冲输出。但是, 当光纤长度不同时, 所能获得的脉冲形状差别较大。图 1(c) 显示了当光纤长度分别为 2.5 m、3.5 m、4.0 m 时, 脉冲的时域强度曲线。可以发现, 脉冲主峰的半峰全宽均可压缩至 40 fs, 而当光纤长度为 4.0 m 时, 脉冲的对比度最好, 脉冲基底最小; 当光纤长度为 2.5 m 时, 脉冲对比度最差, 脉冲基底最大。出现这种现象的原因在于, 为了产生 40 fs 脉宽所需的光谱宽度, 需要通过显著增强脉冲能量来提升非线性效应, 从而展宽光谱。但是, 过量的非线性致啁啾并没有足够的光纤长度来进行色散补偿。当光纤长度为 2.5 m 时, 脉冲主峰半峰全宽达到 40 fs 所需增益为 24 dB, 而当

光纤长度为 3.5 m 和 4.0 m 时,脉冲主峰半峰全宽达到 40 fs 所需增益分别为 18 dB 和 15 dB。因此,对于 1.55 μm 波段的光纤放大器来说,光纤增益系数、光纤长度、光纤色散值、泵浦功率均会显著影响非线性放大及压缩后的脉冲能量、脉冲宽度和脉冲对比度。特别是高能量脉冲,需要对光纤放大器的非线性、净色散、增益进行精细管理。

3 实验结果与讨论

实验装置如图 2 所示,种子脉冲从 Input 端口进入单模光纤功率放大器(SMFA)对功率进行初步提升。单模光纤预放大器的输出脉冲经由准直器 Col₁ 进行准直后转为空间光路,依次经过半波片(HWP)、光隔离器(ISO)、偏振分束器(PBS)后,再进入脉冲分离器。其中,半波片用于调整单模光纤预放大器的输出脉冲的偏振态,直至通过光隔离器(入射光偏振为水平方向)的平均功率达到最大值。PBS 用于提升入射脉冲的偏振对比度,并将水平偏振脉冲导入后续的脉冲分离器,同时 PBS 还用于将

从脉冲分离器和双包层光纤主放大器(DCFA)回返脉冲的垂直分量导出,作为输出(OC1)。脉冲分离器依次由三级 YVO₄ 晶体(2¹、2²、2³)和三级 PBS 分束立方(2⁴、2⁵、2⁶)构成。2¹级 YVO₄ 的光轴与水平方向成 45°角,即可将水平偏振的入射脉冲分离成 2 个偏振正交的子脉冲,子脉冲的时间延时由 YVO₄ 晶体长度决定。2²级 YVO₄ 的光轴为水平方向,即可将 2¹级 YVO₄ 输出的 2 个脉冲分离成 4 个子脉冲。2³级 YVO₄ 的光轴与水平方向再次成 45°角,即可将 2²级 YVO₄ 输出的 4 个脉冲进一步分离成 8 个子脉冲。而后,2⁴、2⁵和 2⁶级 PBS 分束立方的底面与水平方向的夹角依次为 0°、45°和 0°,即可将脉冲进一步分离。其中,2¹、2²、2³级的 YVO₄ 晶体的长度分别为 10、20、40 mm,对应子脉冲的延时量分别为 7、14、28 ps;2⁴、2⁵、2⁶级的 PBS 分束立方所产生的延时量分别为 150、300、600 ps。因此,1 个脉冲经过脉冲分离器后就形成了 8 个脉冲包络,脉冲包络的时间间隔为 150 ps,同时,每个脉冲包络含有 8 个子脉冲,包络里子脉冲的时间间隔为 7 ps,共计形成 64 个子脉冲。

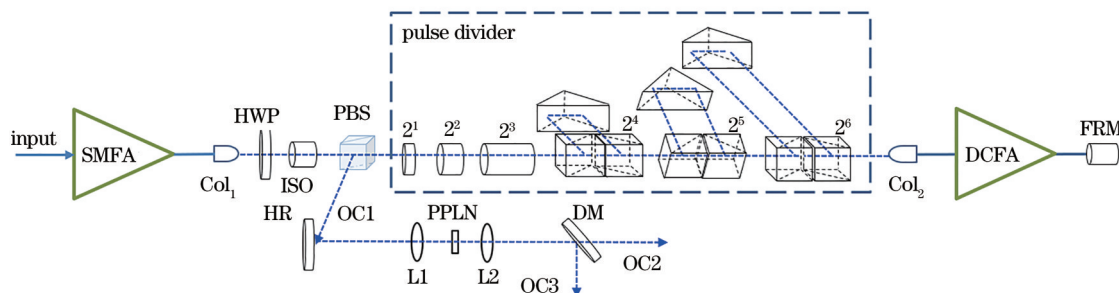


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

通过上述的脉冲分离过程,可有效管理脉冲在双包层光纤放大器中的非线性效应,克服光谱畸变。经脉冲分离后的子脉冲经过准直器 Col₂ 进入双包层光纤放大器,放大器的输出端通过光纤与法拉第反射镜(FRM)相连。法拉第反射镜用于将子脉冲反射并将其偏振方向旋转 90°,并再次通过双包层光纤放大器。这样的双通光纤放大器结构,一方面可以有效降低光纤放大器中增益光纤的自发辐射,另一方面可以有效克服环境扰动给非保偏光纤带来的随机双折射,增强系统抗环境干扰能力,提高输出激光的功率稳定性。子脉冲经过双包层光纤放大器进行往返两次放大后,反向通过改脉冲分离器即可合成一个脉冲,最终从 OC1 端口输出。该双包层光纤放大器采用了两支中心波长 976 nm、最大输出功率均

为 9 W 的多模光纤耦合二极管作为泵浦源,增益光纤为双包层铈共掺光纤,纤芯直径为 12 μm ,包层直径为 130 μm ,二阶色散 β_2 为 $-23 \text{ fs}^2/\text{mm}$ 。

种子脉冲的重复频率为 100 MHz,中心波长为 1570 nm,输出功率为 5 mW,脉冲宽度为 350 fs。当单模光纤放大器的泵浦功率为 400 mW 时,种子脉冲的平均功率可被放大至 100 mW,相应的单脉冲能量为 1.0 nJ。单模光纤放大器的净色散为正值,其输出脉冲带有一定程度的正啁啾。通过改变单模光纤放大器的泵浦功率和光纤长度,该放大器的输出脉冲宽度可在 1.5~5.0 ps 范围内调节。图 3(a) 及其插图显示了单模光纤功率放大器的光谱曲线和自相关曲线。其中,光谱的半峰全宽为 14 nm,自相关曲线的半峰全宽为 4.5 ps。相较于

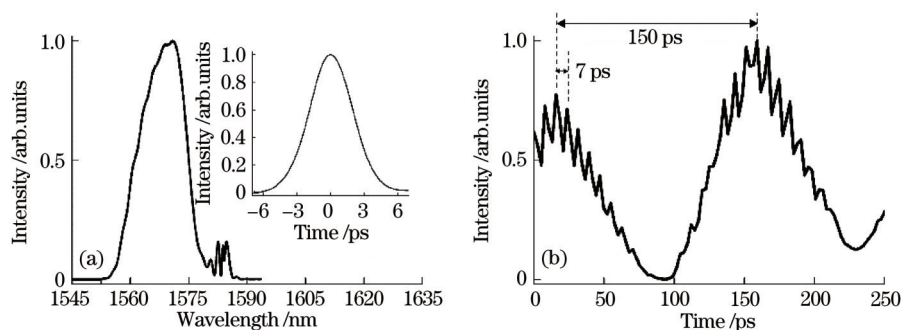


图3 实验结果。(a)单模光纤功率放大器输出的脉冲光谱(插图:自相关曲线);(b)64脉冲分离后,子脉冲串的部分自相关曲线
Fig. 3 Experimental results. (a) Pulse spectrum output by single-mode fiber power amplifier (inset: autocorrelation curve); (b) partial autocorrelation curve of the sub-pulse train after 64 pulses are separated

入射脉冲 350 fs 的脉冲宽度,单模光纤放大器输出脉冲的宽度展宽了近 9 倍。种子光经过 64 脉冲分离器后,自相关曲线如图 3(b)所示。图中,可以明显看到 2 个脉冲包络,峰值间隔约为 150 ps,与 PBS 分束立方所产生的延时量对应;另外可以看出,位于 100~220 ps 处的包络由 15 个次峰构成,次峰的间隔约为 7 ps,与 YVO₄ 分离器所产生的延迟量对应。

实验上,本文分别研究了高非线性条件和低非

线性条件下的分离脉冲放大和压缩过程,以及合成效率。在低非线性条件下,光纤主放大器的光纤总长度约为 2.5 m、泵浦光功率为 16 W 时,从 OC1 端口(脉冲合成)测量到的输出功率为 3.0 W。如图 4(a)和 4(b)所示,放大后的光谱宽度为 18 nm,脉冲宽度为 830 fs,相应的峰值功率约为 36.1 kW。此时,ISO 反向泄露端口(脉冲未合成)的功率约为 0.1 W,相应的合成效率为 96.8%,即光纤主放大器总增益约为 14.9 dB。

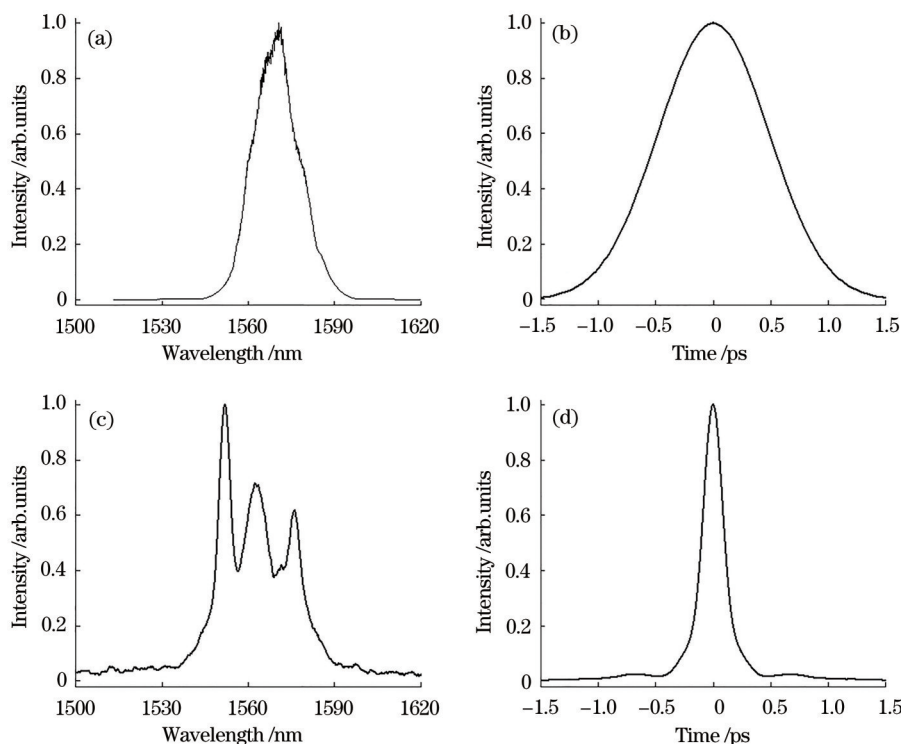


图4 实验结果。低非线性条件下主放大器的(a)输出光谱和(b)自相关曲线;高非线性条件下主放大器的(c)输出光谱和(d)自相关曲线

Fig. 4 Experimental results. (a) Output spectrum and (b) autocorrelation curve of main amplifier under low non-linearity condition; (c) output spectrum and (d) autocorrelation curve of main amplifier under high non-linearity condition

在高非线性放大区, 光纤主放大器的光纤总长度约为 4.0 m、泵浦光功率为 15 W 时, 从 OC1 端口 (脉冲合成) 测量到的输出功率为 1.54 W。此时, OC1 端口输出脉冲的光谱如图 4(c) 所示, 可以看出, 相较于种子脉冲的光谱, 放大器的输出光谱在自相位调制的作用下展宽超过了 1 倍, 半峰全宽达到 30 nm, 傅里叶变换后的脉宽极限为 83 fs。图 4(d) 显示了在 OC1 端口测量到的输出脉冲的脉冲宽度, 可以看出, 自相关曲线的半峰全宽为 210 fs, 在距离自相关曲线峰值约 700 fs 处, 略有脉冲旁瓣出现。在 sech^2 曲线的拟合下, 相应脉冲宽度为 137 fs, 相应的峰值功率约为 112 kW。实际测量到的脉冲宽度约为其变换极限脉冲的 1.7 倍, 没有压缩到变换极限脉冲是由于双包层光纤放大器中的高阶非线性、光纤及脉冲分离晶体中的高阶色散所致。当主放大 OC1 端口 (脉冲合成) 的输出功率为 1.54 W 时, ISO 反向泄露端口 (脉冲未合成) 的功率约为 1.0 W, 相应的合成效率仅为 60%, 即光纤主放大器总增益约为 14.0 dB。

为了说明光纤主放大器产生的 1560 nm 的脉

冲质量, 本文将 OC1 端口的输出脉冲进行了光学倍频。光纤放大器的输出脉冲经 1560 nm 的 45° 高反镜 (HR) 进行准直, 再由一对透镜 (L1 和 L2) 分别在周期极化铌酸锂晶体 (PPLN) 晶体前后进行聚焦和准直, 倍频后的脉冲由一个 45° 入射的 780/1560 nm 双色镜 (DM) 进行分光。其中, 倍频晶体为 PPLN, 工作波长为 1560 nm, 双面镀 1560 nm 和 780 nm 增透膜, 晶体厚度为 0.35 mm, 极化周期为 20.9 μm 。当 1560 nm 脉冲的入射平均功率为 1.54 W 时, 778 nm 的输出功率为 620 mW, 倍频效率为 40.3%。图 5(a) 为倍频后的光谱, 中心波长为 778 nm, 半峰全宽约为 3.7 nm。图 5(b) 显示了 778 nm 脉冲的自相关曲线, 其半峰全宽为 232 fs。在 sech^2 曲线的拟合下, 相应脉冲宽度为 150 fs, 几乎没有脉冲旁瓣, 相应的峰值功率为 41.3 kW。我们进一步测量了双包层光纤放大器输出 1560 nm 脉冲和倍频 778 nm 脉冲的 10 h 的功率稳定性。图 5(c) 和 5(d) 分别显示在激光系统预热后 1560 nm 脉冲和倍频 778 nm 脉冲的功率稳定性, 8 h 的稳定功率优于 1%。

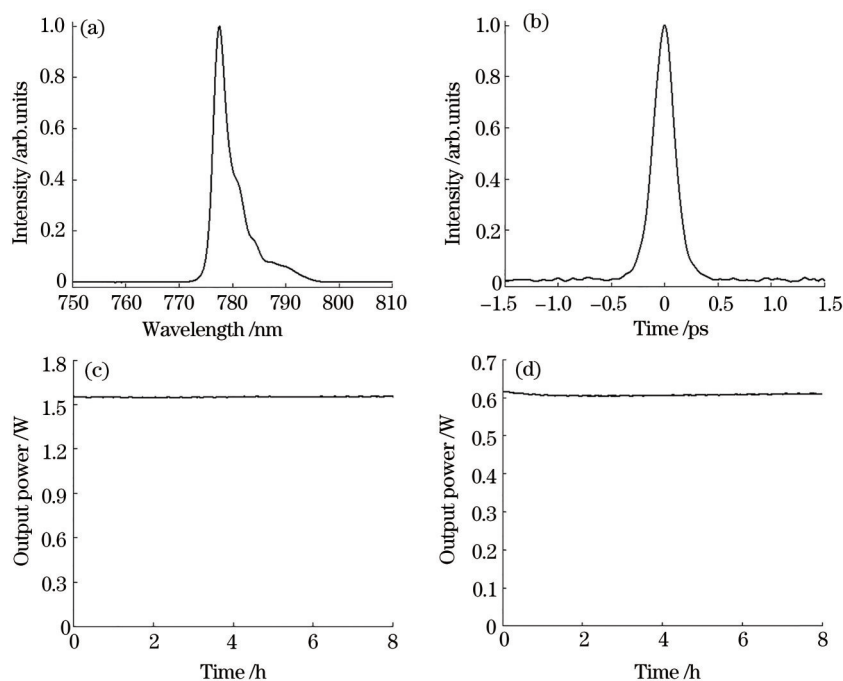


图 5 实验结果。(a) 778 nm 脉冲的输出光谱; (b) 778 nm 脉冲的自相关曲线; (c) 1560 nm 脉冲的功率稳定性; (d) 778 nm 脉冲的功率稳定性

Fig. 5 Experimental results. (a) Output spectrum of 778 nm pulse; (b) autocorrelation curve of 778 nm pulse; (c) power stability of 1560 nm pulse; (d) power stability of 778 nm pulse

4 结 论

本文报道了基于分离脉冲方式的 1.5 μm 波段

超短脉冲光纤放大技术。从数值模拟的角度分析了增益系数和光纤长度对正啁啾种子脉冲在负色散掺铒光纤中功率放大和脉冲压缩的物理过程。

在实验上,通过偏振复用生成 64 个子脉冲,有效地管理了超短脉冲功率放大过程中的非线性效应,在高非线性条件和低非线性条件下分别获得平均功率 1.54 W、脉冲宽度 137 fs 以及平均功率 3 W、脉冲宽度 830 fs 的脉冲输出。最后,通过 PPLN 光学倍频获得了平均功率为 620 mW、脉冲宽度 150 fs、中心波长 778 nm 的脉冲激光,相应倍频效率为 40.3%。该飞秒激光适合作为钛宝石飞秒脉冲激光器的替代光源,应用于痕量气体分析、太赫兹科学与仪器、生物光子学成像等多个科研领域和工业应用。

参 考 文 献

- [1] Lee C, Chu S T, Little B E, et al. Portable frequency combs for optical frequency metrology[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16671-16676.
- [2] Morin F, Druon F, Hanna M, et al. Microjoule femtosecond fiber laser at 1.6 μm for corneal surgery applications[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 1991-1993.
- [3] Gottschall T, Meyer T, Baumgartl M, et al. Fiber-based optical parametric oscillator for high resolution coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) microscopy[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21921-21928.
- [4] Dietz R J, Vieweg N, Puppe T, et al. All fiber-coupled THz-TDS system with kHz measurement rate based on electronically controlled optical sampling [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6482-6485.
- [5] Yan P P, Gong H, Ye F, et al. All polarization-maintaining erbium-doped fiber based optical comb [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0115001. 鄢朋朋, 贡航, 叶飞, 等. 全保偏掺铒光纤光梳[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0115001.
- [6] Hu X L, Gan J W, Yang Z J, et al. Difference-frequency generation of mid-infrared picosecond laser by pulse synchronization technology based on all polarization-maintaining fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0736001. 胡晓蕾, 甘继伟, 杨占军, 等. 基于全保偏光纤利用脉冲同步技术差频产生中红外皮秒激光[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0736001.
- [7] Chen L, Liu X D, Liu J, et al. Microgroove etching with femtosecond laser in quartz glass surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2314001. 陈亮, 刘晓东, 刘静, 等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2314001.
- [8] Imeshev G, Hartl I, Fermann M E. An optimized Er gain band all-fiber chirped pulse amplification system [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6508-6514.
- [9] Pavlov I, Ilbey E, Dülgergil E, et al. High-power high-repetition-rate single-mode Er-Yb-doped fiber laser system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9471-9475.
- [10] Dai W, Song Y J, Xu B, et al. High-power sub-picosecond all-fiber laser source at 1.56 μm [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 111402.
- [11] Sobon G, Kaczmarek P R, Sliwiska D, et al. High-power fiber-based femtosecond CPA system at 1560 nm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 492-496.
- [12] Wei R L, Wang M M, Zhu Z X, et al. High-power femtosecond pulse generation from an all-fiber Er-doped chirped pulse amplification system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1-8.
- [13] Zhou S A, Ouzounov D G, Wise F W. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses[C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2007: 1-2.
- [14] Hao Q, Zhang Q S, Sun T T, et al. Divided-pulse nonlinear amplification and simultaneous compression [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(10): 101103.
- [15] Luo P, Hao Q, Fu H M, et al. 60 nJ, 95 fs environmentally stable Er-doped fiber laser system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(6): 061401.
- [16] Zhao L M, Lefrancois S, Ouzounov D G, et al. Megawatt peak power picosecond pulse fiber amplifier based on divided-pulse amplification[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2012, May 6-11, 2012, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2012: CTu2M.3.
- [17] Zaouter Y, Guichard F, Daniault L, et al. Femtosecond fiber chirped- and divided-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 106-108.
- [18] Lesparre F, Gomes J T, Délen X, et al. Yb:YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1628-1631.
- [19] Webb B, Azim A, Bodnar N, et al. Divided-pulse amplification to the joule level[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 3106-3109.
- [20] Stark H, Buldt J, Müller M, et al. 23 mJ high-power fiber CPA system using electro-optically controlled divided-pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5529-5532.