

脉冲自发辐射放大光源的产生与放大特性研究

孙海跃¹, 陈胜平², 齐雪², 钟明飞¹

¹中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431;

²国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 自发辐射放大(ASE)光源作为一种非相干光源,在生物医学等领域发挥着重要作用。利用脉冲 ASE 光源作为抽运源激发非线性介质产生的超连续谱,具有低时间相干性和宽光谱特性,使其具备更加广阔的应用前景。研究了脉冲 ASE 光源的产生和放大过程,获得瓦级纳秒脉冲 ASE 光源;采用光纤环形反射镜结构提高带内功率,得到 280 mW 连续窄谱带 ASE 输出;利用声光调制器和电光调制器共同调制连续窄谱带 ASE,得到脉宽为 8 ns、重复频率为 50 kHz、平均功率为 50 μ W 的脉冲 ASE;并且详细研究了具有不同脉冲波形的 ASE 的放大过程。

关键词 激光光学; 自发辐射放大; 纳秒脉冲; 光纤环形反射镜

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0601005

Generation and Amplification Characteristics of Pulse Amplified Spontaneous Emission

Sun Haiyue¹, Chen Shengping², Qi Xue², Zhong Mingfei¹

¹Chinese Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China;

²College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract As a non-coherent light source, the amplified spontaneous emission (ASE) sources play an important role in biomedical field. The pulsed ASE light source is used as a pumping source to stimulate the supercontinuum generated by the nonlinear medium, which has low temporal coherence and broad spectral characteristics, making it have a broader application prospects. The generation and amplification processes of a pulse ASE source are investigated. The nanosecond pulse ASE light source at a watt level is obtained. A fiber loop mirror structure is used to promote the in-band power, which resulting in a 280 mW continuous narrowband ASE output. And using an acousto-optic modulator and an electro-optic modulator to modulate a continuous narrowband ASE, with a pulse width of 8 ns, a repetition frequency of 50 kHz and an average power of 50 μ W. The amplification process of ASE with different pulse shapes is studied in detail.

Key words laser optics; amplified spontaneous emission; nanosecond pulse; fiber loop reflector

OCIS codes 140.3510; 060.2310; 060.4370

1 引 言

光学相干层析等技术的应用要求光源具有低时间相干性^[1-3],以获得高成像分辨率。一方面,自发辐射放大(ASE)光源作为一种非相干光源,自身可以满足这样的要求^[4-7];另一方面,将 ASE 用于抽运非线性介质产生超连续谱,以其宽光谱和低时间相

干性的特点,可以满足更多的应用需求^[8-11]。在功率放大方面,与激光光源相比,ASE 光源的优势在于没有纵模的谱线结构,因而在放大器中即使放大到很高的峰值功率也不会产生很强的非线性效应,从而有利于将 ASE 光源应用于高峰值功率放大器^[12-13]。

本文研究了脉冲 ASE 种子源的获取,及其时域

收稿日期: 2017-10-25; 收到修改稿日期: 2017-11-23

作者简介: 孙海跃(1990—),男,硕士研究生,主要从事超连续谱光源方面的研究。E-mail: 18229860060@163.com

导师简介: 陈胜平(1979—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事超连续谱光源方面的研究。

E-mail: chespn@163.com

和光谱特性。将脉冲 ASE 种子源放大,得到高峰值功率的脉冲 ASE 输出,并对放大过程进行了详细分析。

2 实验装置的结构与脉冲 ASE 的产生

首先利用光纤环形反射镜结构得到输出功率为 280 mW 的连续 ASE 光源,中心波长为 1060 nm;然后利用声光调制器(AOM)和电光调制器(EOM)对连续的 ASE 光进行调制,获得脉冲宽度为 8 ns,输出功率为 50 μ W 的脉冲 ASE。

采用图 1(a)所示的实验装置结构,可以得到宽谱的 ASE 输出。增益光纤为 4.5 m 双包层掺镱光纤(YDF),其纤芯、包层直径分别为 10、125 μ m。合束器信号臂光纤的纤芯、包层直径分别为 10、125 μ m;抽运臂光纤与半导体激光器(LD)的输出端光纤相同,纤芯、包层直径分别为 105、125 μ m。当 LD 抽运功率为 9.7 W 时,ASE 的后向输出功率为 2.5 W;前向输出功率为 2 W,输出光谱如图 1(b)所示。

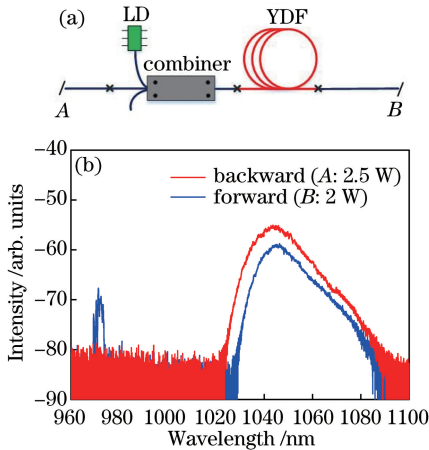


图 1 宽谱连续 ASE 光源。(a)实验结构图;(b) ASE 光谱

Fig. 1 Wide band continuous ASE source.

(a) Experimental structure; (b) ASE spectrum

为了获得 1060 nm 的光谱输出,将滤波器接入实验装置中。带通滤波器(BPF)工作波长为 1060 nm,带宽为 8 nm。如图 1(b)所示,宽谱 ASE 的中心波长位于 1045 nm,而滤波器工作的 1060 nm 带内所占成分较少。故将滤波器输出端切平角,利用端面反射光在 YDF 中放大,以获得更高的输出功率。实验结构如图 2(a)所示,其中高功率光隔离器(ISO)的隔离度为 30 dB。当抽运功率高于 4.5 W 时,输出 ASE 会出现自激。在 4.5 W 抽运功率下,ASE 后向输出功率为 88 mW,前向输出功率为 160 mW,ASE 光谱如图 2(b)所示。在图 1(a)产生宽谱 ASE 的实验装置结构中,抽运光为 4.5 W

时,宽谱 ASE 的输出功率只有约 100 mW。因此,在产生 ASE 时,利用光纤端面的反射光可以提高 ASE 的输出效率。

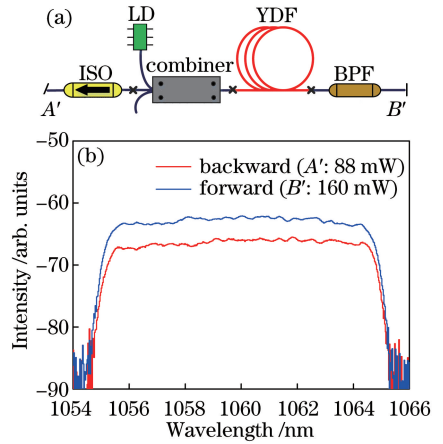


图 2 滤波后的连续 ASE 光源。(a)实验结构图;(b) ASE 光谱

Fig. 2 ASE source after the filter.

(a) Experimental structure; (b) ASE spectrum

为了更好地利用反射的 1060 nm ASE,以提高 ASE 的输出效率和输出功率,在装置中加入一个耦合比为 50:50 的耦合器,构成光纤环形反射镜结构,如图 3(a)所示。各器件尾纤的纤芯、包层直径分别为 10、125 μ m。在抽运功率为 1.5 W 时可得到 280 mW 的 1060 nm ASE 输出,图 3(b)为其光谱。可见,采用光纤环形反射镜结构可提高 ASE 的输出效率。

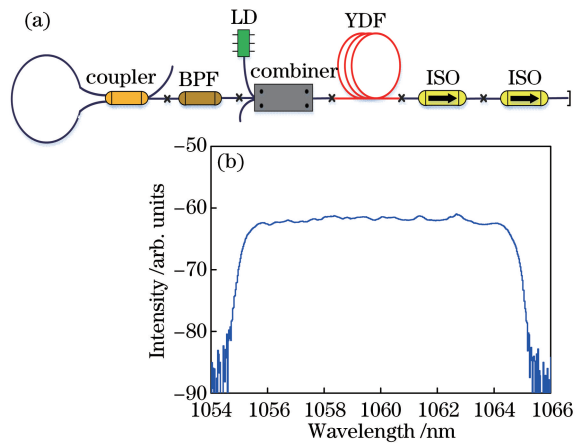


图 3 (a)光纤环形反射镜式连续 ASE 光源结构图;

(b) ASE 光谱

Fig. 3 (a) Experimental structure of continuous ASE source with a fiber loop reflector; (b) ASE spectrum

AOM 和 EOM 均可用于调制连续光获得脉冲输出,但是其调制性能有所差异。分别利用单一的 AOM 或 EOM 对连续光进行主动调制,可以得到具有相应时域特性的脉冲 ASE^[9,15]。AOM 具有很

高的消光比,从抑制脉冲中连续基底的角度考虑,AOM具有很大优势。但是利用AOM进行调制时,由于其对窄带脉宽驱动响应性能差,当驱动信号脉宽低于40 ns时,若继续减小脉宽,AOM对光信号的透过率将会不断减弱。EOM可以很好地响应窄带脉冲的驱动。但是,由于其消光比很低,调制后的脉冲光连续基底不能忽略;另外,因其只能响应高频驱动信号,在低频信号驱动下无法工作。因此,单个调制器的使用,限制了脉冲占空比的优化,从而影

响脉冲峰值功率的提升。为了使调制后的脉冲光具有合适的占空比,使其在光放大器后达到足够高的峰值功率,本文同时利用AOM和EOM对连续ASE进行调制,既可消除种子光中连续ASE成分对后续放大的影响,又能得到窄带的脉冲光输出。如图4所示,在由单模耦合器(SMC)组成的环形反射结构获得的连续ASE光源基础上,熔接一个AOM,将输出的连续ASE调制成脉冲光输出,并在其后熔接一个EOM进一步精细控制脉冲宽度。

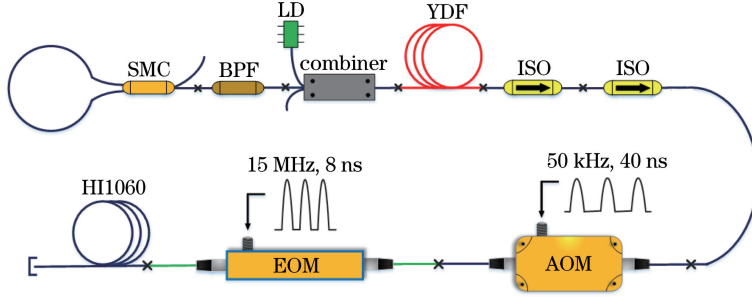


图4 脉冲 ASE 种子源

Fig. 4 Pulse ASE source

利用信号发生器输出信号时,依据AOM的调制特性,将驱动信号脉宽设置为40 ns,使得光信号经过AOM时透过率不受调制脉宽的影响。由于EOM对低频信号没有响应,故将EOM的调制频率设为15 MHz,脉冲宽度设为8 ns。

连续ASE光源输出功率为280 mW,接入AOM并加入驱动信号后输出功率为350 μ W;再接入EOM,当AOM和EOM均未工作时,输出功率为40 nW;只驱动AOM,输出功率为26 μ W,脉冲宽度为40 ns;再驱动EOM后输出功率为50 μ W,脉冲宽度为8 ns。由于EOM尾纤为保偏光纤,为保证与后续放大器的熔接质量,在EOM尾纤后接入一段60 cm长的单模光纤(HI1060, Corning公司,美国)。经测量,接入的单模光纤几乎没有损耗输出光功率。输出脉冲的时域和光谱特性如图5所示,其中图5(d)为设置AOM在不同调制频率下获得的光谱,由低到高的光谱对应的脉冲重复频率分别为50,100,200,500 kHz。

3 脉冲 ASE 的放大与分析

将50 μ W脉冲ASE作为种子光源,经过主振荡功率放大(MOPA)结构后,得到高功率的脉冲ASE输出。

3.1 脉冲 ASE 经一级放大后的输出特性

用两个低功率的级联单模放大器将脉冲种子源功

率放大到 10^1 mW量级,为后续进一步放大提供足够高功率的光源,实验装置结构如图6所示,此过程称为一级放大。单模放大器中采用50 cm单模YDF作为增益介质,采用波分复用器(WDM)将抽运光耦合进YDF中,滤波器工作波长为1060 nm,带宽为8 nm。

50 μ W的脉冲ASE种子源经过一级放大后的输出功率为31 mW,其时域和光谱如图7所示。

图7(b)所示的光谱包含50 μ W脉冲ASE种子源的光谱,该种子源放大后的光谱,以及连续的宽带ASE经过BPF后的光谱,用来检验BPF的滤波性能。从图7可以看出,BPF的抑制比大于50 dB。可见,脉冲种子源在放大后的光谱展宽不是放大器中产生的连续ASE基底,而是由脉冲ASE在滤波器后的光纤中发生自相位调制等非线性效应引起的光谱展宽,此时脉冲峰值功率约为80 W,产生非线性的光纤长度约为4 m,展宽后光谱的50 dB带宽为30 nm(1045~1075 nm)。

3.2 脉冲 ASE 经二级放大后的输出特性

将一级放大后的脉冲信号接入下一级放大器,经过两个隔离器后获得1.91 W的脉冲光输出,将该过程称为二级放大,实验装置结构如图8所示。二级放大器利用一段长为4 m的双包层YDF提供增益;抽运源为功率可调的976 nm多模LD,最高抽运功率为8 W;两个隔离器的尾纤为双包层光纤(DCF),长度共6 m。

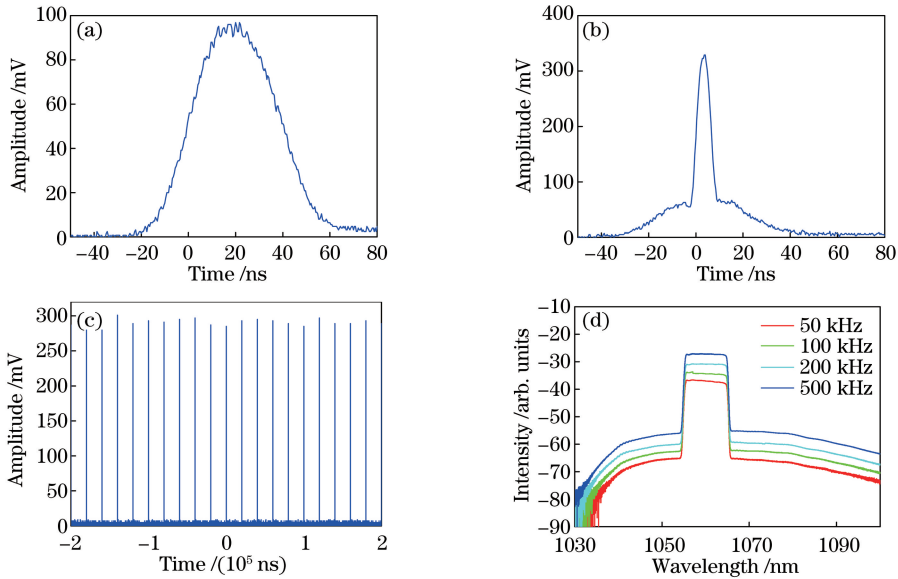


图 5 脉冲 ASE 种子源输出特性。(a) 仅 AOM 工作时输出功率 $26 \mu\text{W}$; (b) EOM 工作时输出功率 $50 \mu\text{W}$; (c) 重复频率为 50 kHz 的脉冲序列; (d) 不同重复频率对应的光谱
 Fig. 5 Output characteristics of pulse ASE seed. (a) $26 \mu\text{W}$ output power when the AOM works only; (b) $50 \mu\text{W}$ output power when the EOM also works; (c) pulse sequence of 50 kHz repetition frequency; (d) spectrum corresponding to different repetition frequencies

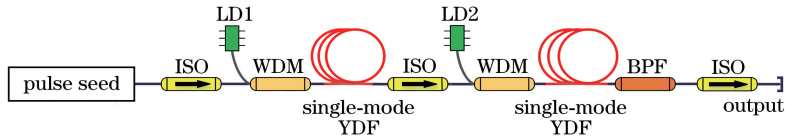


图 6 脉冲 ASE 光源的一级放大结构图

Fig. 6 Experimental structure of the pulse ASE source after the first order amplification

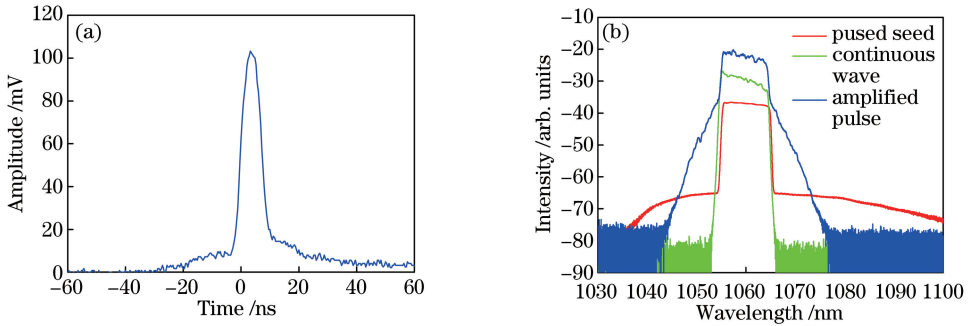


图 7 一级放大后脉冲 ASE 的输出特性。(a) 时域特性; (b) 输出光谱

Fig. 7 Output characteristics of pulse ASE after the first order amplification.

(a) Temporal characteristics; (b) output spectrum

在二级放大器接入隔离器前,将输出端切斜角测量输出光的特性。当只开一级放大时,二级放大器后输出功率为 6.5 mW 。逐渐提高二级放大器的抽运功率,脉冲 ASE 的输出功率也逐渐升高,最高输出功率为 3.4 W 。图 9 为二级放大后脉冲 ASE 的光谱和时域特性随输出功率的变化规律。

从图 9(a)可以看出,随着输出功率的增加,脉

冲 ASE 的光谱发生了展宽;在输出功率为 3.4 W 时,光谱的 50 dB 带宽为 70 nm ($1030 \sim 1100 \text{ nm}$)。

由图 9(b)可知,经过二级放大后,由于增益饱和和效应,脉冲前沿会消耗大量上能级粒子,使得后沿放大受限,这在一定程度上影响了脉冲峰值功率的提升。通过调整 AOM 和 EOM 驱动信号的时间延迟,可以将脉冲光中由 EOM 调制的 8 ns 成分置于

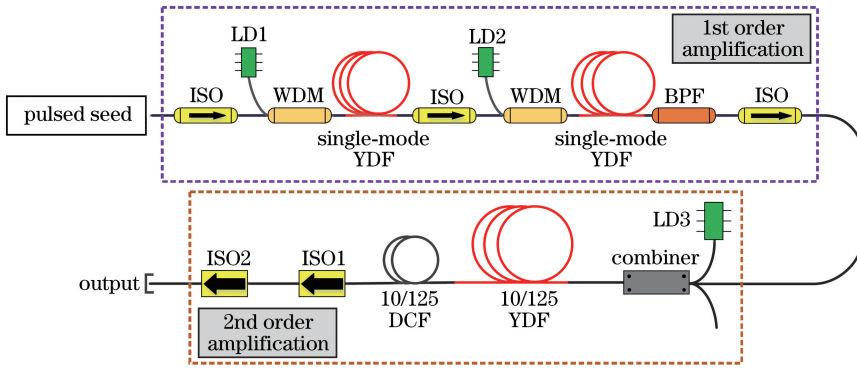


图 8 脉冲光源经过二级放大的实验结构图

Fig. 8 Experimental structure of the pulse source after the second order amplification

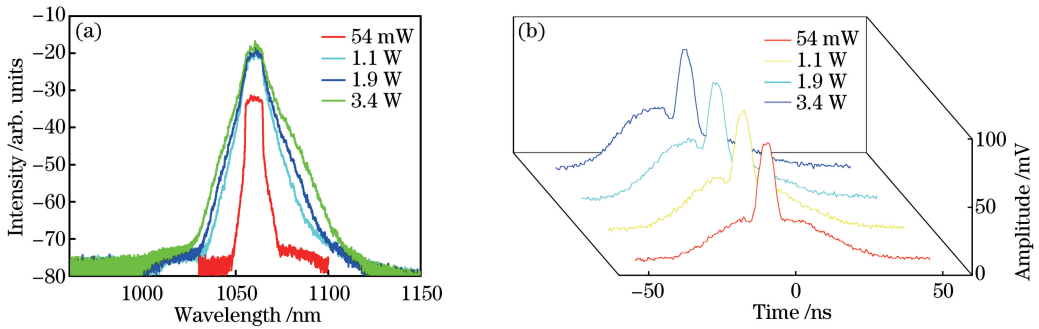


图 9 输出功率对脉冲光谱和时域特性的影响。(a)输出光谱;(b)时域特性

Fig. 9 Effect of output power on pulse spectrum and temporal characteristics.

(a) Output spectrum; (b) temporal characteristics

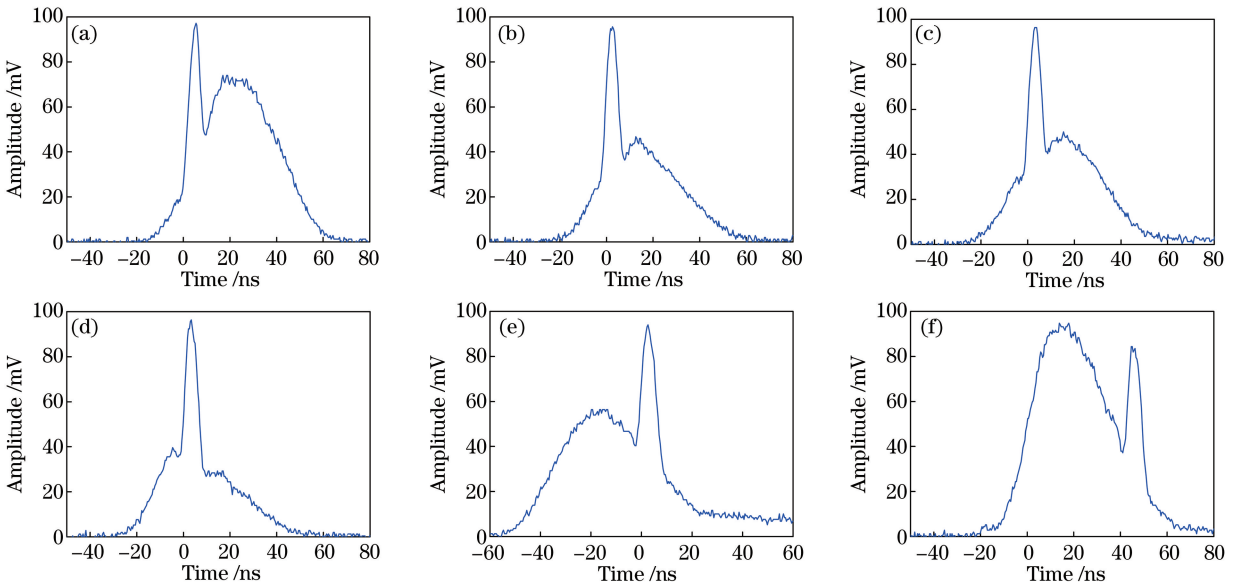


图 10 不同设置下脉冲的时域特性。(a)窄带脉冲前移 20 ns;(b)对应(a)的脉冲时域;

(c)窄带脉冲前移 11 ns;(d)对应(c)的脉冲时域;(e)将窄带脉冲后移 20 ns;(f)对应(e)的脉冲时域

Fig. 10 Temporal characteristics of the pulse under different circumstances. (a) Narrow band part moves forward 20 ns; (b) temporal characteristics of Fig. (a); (c) narrow band part moves forward 11 ns; (d) temporal characteristics of Fig. (c);

(e) narrow band part moves back 20 ns; (f) temporal characteristics of Fig. (e)

40 ns 宽脉冲基底的不同位置;从而可以研究不同设置下的脉冲信号经过二级放大前后的时域变化和光

谱展宽情况,如图 10 所示。图 10(a)、(c)和(e)分别为未开二级放大抽运源时,将位于脉冲中央的 8 ns 窄带部分分别向脉冲前沿移动 20 ns、11 ns 以及向脉冲后沿移动 20 ns 的时域图;图 10(b)、(d)和(f)分别为 3 种设置下放大到 3.4 W 时的脉冲时域图。从图 10 可以看出,将窄带脉冲向脉冲前沿移动 11 ns,经放大后窄带成分占整个脉冲的比例最高。

以上各种脉冲设置下,输出 ASE 的平均功率没有变化;脉冲中窄带成分所占的比例不同,对应光脉冲的峰值功率会有所不同,从而可能对 ASE 的光谱展宽产生影响。图 11 为输出功率为 3.4 W 时不同脉冲设置下的输出光谱。

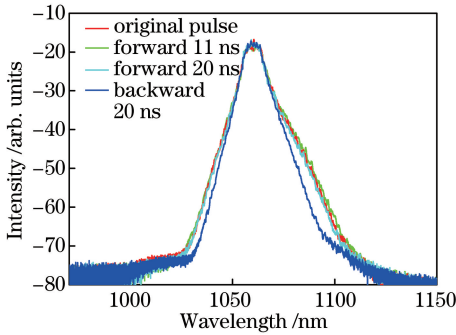


图 11 未接入隔离器时不同脉冲设置下的输出光谱

Fig. 11 Output spectrum of different pulses without isolator

从图 11 可以看出,在 3 种情况下,光谱展宽程度相近(光谱 50 dB 带宽均约为 70 nm),其中前移 11 ns 的光谱展宽相对较多,后移 20 ns 的光谱展宽最弱,其 50 dB 带宽约为 60 nm(1035~1095 nm)。图 11 所示的光谱展宽情况与图 10 中脉冲时域特性相符。

为保证后续放大实验的安全进行,采用两个隔离度为 30 dB 的高功率隔离器,其尾纤纤芯、包层直径分别为 10、125 μm ,长度为 6 m。图 11 中,原脉冲的脉冲光谱展宽与前移 11 ns 相比,有微小的差异;如图 12 所示,当经过 6 m 的隔离器尾纤后,光谱展宽差异变得明显,经过隔离器后,脉冲 ASE 的输出功率由 3.4 W 变为 1.91 W。

原脉冲对应的光谱 50 dB 带宽为 86 nm (1029~1115 nm),前移 11 ns 脉冲的光谱 50 dB 带宽为 93 nm(1027~1120 nm),这表明后者的峰值功率更高。

4 结 论

采用光纤环形反射镜结构,利用 YDF 和 976 nm LD 得到功率为 280 mW,光谱 3 dB 带宽为

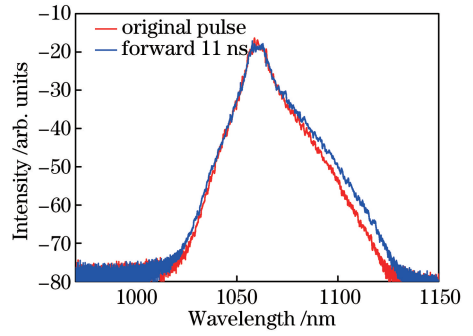


图 12 接入隔离器后不同脉冲设置对应的输出光谱

Fig. 12 Output spectrum of different pulses with isolator

8 nm 的连续 ASE 光输出;利用 AOM 和 EOM 共同调制连续光 ASE,得到脉宽为 8 ns,重复频率为 50 kHz 的脉冲 ASE 种子光源,输出功率为 50 μW 。

将脉冲 ASE 种子光源经过 MOPA 结构放大,一级放大器后输出平均功率为 31 mW,在二级放大器后功率提升至 1.9 W。由于增益饱和效应,脉冲前沿的放大效应更为明显。通过调整脉冲 ASE 种子源的时域特性,可以实现不同形状的脉冲输出,并控制相应脉冲输出的峰值功率。

后续工作将进一步消除 ASE 光脉冲中的连续基底成分,优化种子源的脉冲形状,从而获取更高峰值功率的脉冲 ASE 输出。

参 考 文 献

- [1] Guo C Y. The development of optical coherence tomography based on supercontinuum source [J]. China Science & Technology Overview, 2013, 16: 118-119.
郭春雨. 基于超连续谱光源的光学相干层析技术研究进展[J]. 中国科技纵横, 2013, 16: 118-119.
- [2] Yu L Y, Y J, Wan H, *et al.* Study on the method and experiment of time-resolved coherent anti-Stokes Raman scattering using supercontinuum excitation [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5406-5411.
于凌尧, 尹军, 万辉, 等. 基于超连续光谱激发的时间分辨相干反斯托克斯拉曼散射方法与实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5406-5411.
- [3] Lu Y, Li Z L, Wang X Z, *et al.* Development of 50 kHz intravascular swept source optical coherence tomographic System [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0207001.
卢宇, 李中梁, 王向朝, 等. 50 kHz 血管内扫频光学相干层析成像系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0207001.
- [4] Rulkov A B, Ferin A A, Travers J C, *et al.* Broadband, low intensity noise CW source for OCT

- at 1800 nm[J]. Optics Communications, 2008, 281(1): 154-156.
- [5] Liu Y Y, Yang L Z, Wang F F, *et al.* Link fault detection in passive optical networks based on correlation method combined with an amplified spontaneous emission source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0805004.
刘艳阳, 杨玲珍, 王斐斐, 等. 放大自发辐射光源结合相关法实现无源光网络故障检测[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805004.
- [6] Li L, Jia Z A. Experimental investigation on dual-stage dual-pump Erbium-doped super-fluorescent light source[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2016, 22(3): 298-302.
李丽, 贾振安. 双级双泵浦掺铒光纤 C+L 波段 ASE 光源的实验研究[J]. 量子光学学报, 2016, 22(3): 298-302.
- [7] Long H, Yao B, Mao Q H. Reusing the backward ASE in Tm-Ho co-doped fiber amplifiers based on FBG[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505006.
龙虎, 姚波, 毛庆和. 基于 FBG 铥钬共掺光纤放大器反向 ASE 的再利用[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505006.
- [8] Matos C D, Popov S, Taylor J. Temporal and noise characteristics of continuous-wave-pumped continuum generation in holey fibers around 1300 nm [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(14): 2706-2708.
- [9] Takushima Y. High average power, depolarized super-continuum generation using a 1.55 μm ASE noise source [J]. Optics Express, 2005, 13(15): 5871-5877.
- [10] Chow K K, Takushima Y, Mizuno Y. High average power super-continuum generation using a 1 μm ASE noise source [C]. Conference on Lasers & Electro-Optics, 2006, 978: CFK6.
- [11] Lee J H, Jung E J, Kim C S. Incoherent CW supercontinuum source based on erbium fiber ASE for optical coherence tomography imaging [C]. Optoelectronics & Communications Conference, 2009, 978: 1-2.
- [12] Meng K, Zhang H T, Liu M, *et al.* 670 kW nanosecond all-fiber super irradiation pulsed amplifiers at high repetition rates [J]. Journal of Optics, 2014, 16(10): 105202.
- [13] Shen X L, Zhang H T, Gong M. Nanosecond pulses with high energy (100 mJ) and high peak power (8 MW) generated by super-radiation fiber amplifier system [C]. Advanced Solid State Lasers, 2014, 978: AM5A.12.
- [14] Chow K K. High average power super-continuum generation using 1 μm noise burst and highly-nonlinear photonic crystal fibre [J]. Electronics Letters, 2012, 48(13): 781-783.