

基于全固光子带隙光纤中自频移孤子的相干合成 产生少周期飞秒激光脉冲

彭天铎 刘博文* 张巨慧 胡明列 柴路 王清月

天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 报道了一种基于同一台光纤飞秒激光器的双路飞秒激光相干合成技术, 获得脉宽只有4个光学周期(14 fs)的少周期飞秒脉冲。通过数值模拟证明了基于自频移孤子的相干合成为拓宽光谱、窄化脉冲提供了一个很好的方法, 是获得少周期飞秒脉冲的可行方案。实验中, 一台掺镱光纤飞秒放大系统输出脉宽为62 fs, 中心波长为1040 nm的近变换极限脉冲, 该脉冲分束后, 一束作为基态孤子, 另一束耦合到全固光子带隙光纤中产生自频移孤子, 通过调整入射脉冲功率等参数获得了中心波长为1150 nm, 脉宽为55 fs的近变换极限自频移孤子。将基态孤子与该自频移孤子相干合成, 得到了脉宽仅4个光学周期(14 fs)的激光脉冲。

关键词 非线性光学; 飞秒激光; 相干合成; 自频移孤子; 全固光子带隙光纤

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0702006

Generation of Few-Cycle Femtosecond Pulses via Coherent Synthesis Based on Self-Frequency-Shifted Solitons in All-Solid-State Photonic Bandgap Fiber

Peng Tianduo Liu Bowen Zhang Juhui Hu Minglie Chai Lu Wang Qingyue

Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The synthesis of a nearly four-optical-cycle (14 fs) laser pulse from the coherent combination of dual femtosecond laser pulses with a femtosecond amplifier system is reported. The simulation confirms that the scheme is a viable method to produce few-cycle optical pulses. A Yb^{3+} -doped femtosecond laser fiber amplifier generates 62 fs transform-limited pulses with 1040 nm central wavelength. These pulses are split in two. One is employed as fundamental soliton pulses, the other is coupled into all-solid-state photonic bandgap fiber. The parameters are optimized such as the input power to obtain the 55 fs near transform-limited self-frequency-shifted solitons centered at 1150 nm wavelength. A nearly four-optical-cycle (14 fs) laser pulse is combined via coherent synthesis of the fundamental soliton and the self-frequency-shifted soliton.

Key words nonlinear optics; femtosecond laser; coherent synthesis; self-frequency-shifted soliton; all-solid-state photonic bandgap fiber

OCIS codes 140.3615; 190.4370; 020.1670; 190.5530; 060.5295

收稿日期: 2015-01-18; 收到修改稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(2011CB808101, 2010CB327604)、国家自然科学基金(61322502, 61227010, 61205131, 11274239)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(青年项目)(14JCQNJC02000, 13JCQNJC01400)、天津市科技计划项目(13RCGFGX01122)

作者简介: 彭天铎(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事超短脉冲激光技术方面的研究。E-mail: pengtianduo@126.com

导师简介: 胡明列(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子晶体光纤及超短脉冲激光技术等方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: bwliu@tju.edu.cn

1 引言

少周期飞秒脉冲是指脉冲宽度短至几个光学振荡周期的激光脉冲,极短的脉冲宽度使其作为超快探针可以研究极短时间尺度上的物理、化学、生物现象,在高次谐波的产生、非线性成像、超快动力学研究、强场物理、太赫兹技术等方面有着广泛的应用前景^[1-8]。自1987年首次报道了基于染料飞秒激光系统输出6 fs的少周期脉冲以来^[9],实现少周期甚至是单周期量级脉冲输出就成为飞秒激光技术研究的前沿热点^[10-13]。超宽带光谱是获得少周期脉冲的必要条件,但是依靠单台激光器实现如此宽的光谱难度较大。一个可行的方案是通过两个甚至是多个不同波段的激光光谱相干合成来实现。两台独立飞秒激光器的相干合成研究已经开展,取得了一定的成果^[14-15],但是该方法对两台激光器的重复频率和相位的锁定都有着严格的要求^[16]。与两台独立激光器相干合成相比,基于同一台飞秒激光源的脉冲相干合成则相对简单。由于是同一种子源脉冲,分束后进入不同的高非线性光纤中基于参量过程进行非线性频率变换,保持载波包络相位不变,两路出射脉冲具有相同的载波包络相位^[17];又因为两路光之间的时间抖动在几十阿秒量级对合成效果影响很小^[18],保证了合成脉冲的质量。这样的相干合成技术结构简单、易于控制、光谱可调,是获得少周期飞秒脉冲的重要技术途径。2009年,Stefan等^[17]以掺铒光纤激光器作为种子源,分束后利用不同参数的高非线性光子晶体光纤对其进行长波与短波方向的非线性频率变换,相干合成后得到了脉宽为4.3 fs接近单周期超短激光脉冲。由于非线性光谱展宽过程中的孤子频移效应对入射种子脉冲的能量非常敏感,这种方法对种子源的稳定性提出了很高的要求,又因为单孤子能量的限制,合成后输出的脉冲能量有限。

为了克服这一问题,本文提出了利用全固光子带隙光纤作为非线性光纤进行非线性频率变换。由于全固光子带隙的导光机理为反谐振反射^[19],通过设计高折射率棒的参数改变带隙位置和宽度,进而获得所需的色散曲线。由于带隙长波长边界的“排斥”效应,自频移孤子向长波长移动后,将稳定在带隙的长波长边界附近。与普通的高非线性光纤不同,全固光子带隙的色散曲线几乎与纤芯大小无关,所以纤芯直径可以为10 μm 以上,而一般的非线性光子晶体光纤为4 μm 以下。更大的纤芯尺寸保证了更高的孤子能量,相干合成较高能量的少周期飞秒脉冲。同时本文提出了掺镱光纤飞秒激光系统作为种子脉冲源,可以提供数瓦量级的平均功率和小于100 fs的脉冲宽度,用于获得更高功率和更短脉冲^[20]。实验中,利用本课题组一台掺镱光纤飞秒激光放大系统^[21]输出脉宽为62 fs的近变换极限脉冲作为种子源,中心波长为1040 nm,分束后一路作为近变换极限的基态孤子,另一路利用一段50 cm长的全固光子带隙光纤进行孤子频移,获得了中心波长为1150 nm的自频移孤子输出,将两路脉冲相干合成后获得了14 fs(4个光学周期)的少周期超短脉冲输出。

2 数值模拟

利用分步傅里叶法^[22]数值模拟飞秒激光脉冲在非线性光纤中的高阶孤子分裂,再分析高阶孤子之间相干合成之后的时域脉冲特性。在数值模拟中入射脉冲为双曲正割型飞秒脉冲,脉宽为200 fs,中心波长为1030 nm,峰值功率为3000 W,初始零啁啾($C=0$)。高非线性光纤在1030 nm处为负色散,长度为10 cm,光纤的非线性系数 $\gamma=0.084 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$,各阶色散值分别为 $\beta_2=-54.6 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3=-9.24 \times 10^{-2} \text{ ps}^3/\text{km}$, $\beta_4=-1.124 \times 10^{-5} \text{ ps}^4/\text{km}$, $\beta_5=-2.58 \times 10^{-7} \text{ ps}^5/\text{km}$, $\beta_6=2.47 \times 10^{-9} \text{ ps}^6/\text{km}$ 。飞秒激光在高非线性光纤中传输时,中心波长位于光纤的负色散区,由于飞秒激光的脉冲能量超过了基态孤子的能量限制,脉冲在传输过程中,首先形成高阶孤子,高阶孤子受到高阶非线性效应的作用,分裂为多个孤子脉冲,在自频移的作用下中心波长分别向长波长频移,最后形成不同波长的孤子脉冲输出,如图1所示。图1中,脉冲经过10 cm高非线性光纤传输后,形成了三个中心波长不同的自频移孤子,在时域和频域都是相互独立,彼此间没有重叠。频移孤子脉冲宽度 $T_1=25 \text{ fs}$, $T_2=24 \text{ fs}$, $T_3=20 \text{ fs}$,中心波长 $\lambda_1=1095 \text{ nm}$, $\lambda_2=1211 \text{ nm}$, $\lambda_3=1536 \text{ nm}$;孤子间相互时间延迟为 $\Delta t_1=175 \text{ fs}$, $\Delta t_2=714 \text{ fs}$, $\Delta t_3=1979 \text{ fs}$ 。

之后研究了高阶孤子间相干合成获得少周期飞秒激光脉冲,为后面的实验提供理论依据。由于分裂形成的孤子之间具有稳定的相位差^[23],将出射的孤子脉冲分别给予不同的时域相位补偿,使彼此间相对延迟为零,在时域与空间合成后,由于孤子脉冲时域最大值之间的干涉增强,脉冲两侧干涉减弱,合成后的脉宽变窄^[17]。首先进行了两个自频移孤子间的相干合成,将高非线性光纤输出的三个孤子中的中心波长为1211 nm

与 1536 nm 的两个孤子进行相干合成, 获得了脉冲宽度为 8.8 fs(近 3 个光学周期)的输出, 如图 1(c)所示, 合成后脉宽比两个孤子合成脉冲窄。由于脉冲两侧的干涉减弱并不是减小到零, 所以合成后脉冲存在一定基底, 但强度远低于中心主峰。接着进行了三个自频移孤子的相干合成, 将 1095 nm 的孤子与 1211 nm、1536 nm 的孤子相干合成, 获得了脉冲宽度为 7.3 fs(近两个光学周期)的输出[见图 1(d)]。可以清楚地看出, 随着合成孤子数的增加, 脉冲时域宽度减小。数值模拟结果表明, 基于自频移孤子的相干合成为拓宽光谱、窄化脉冲提供了一个很好的方法, 是获得少周期飞秒脉冲的可行方案。

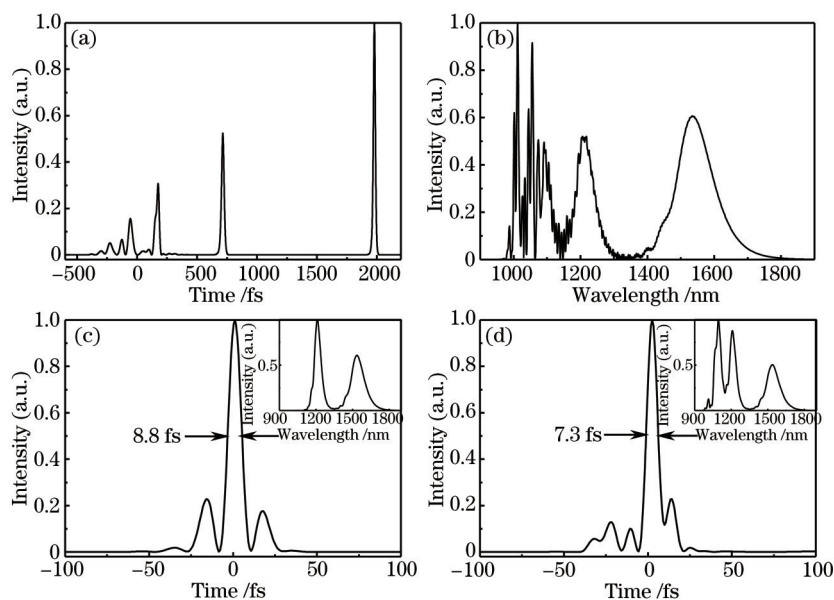


图 1 (a) 输出分裂的高阶孤子的时域强度曲线; (b) 输出分裂的高阶孤子的光谱曲线; (c) 中心波长分别为 1211、1536 nm 的孤子相干合成后脉冲时域强度曲线, 插图为光谱曲线; (d) 中心波长分别为 1095、1211、1536 nm 的三自频移孤子相干合成后脉冲时域强度曲线, 插图为光谱曲线

Fig.1 (a) Temporal trace for divided high-order soliton output; (b) spectral trace for divided high-order soliton output; (c) temporal and spectral (shown in the inset) trace for divided high-order soliton output synthesized by two frequency-shifted solitons at the center wavelength of 1211, 1536 nm respectively; (d) temporal and spectral (shown in the inset) trace for divided high-order soliton output synthesized by three frequency-shifted solitons at the center wavelength of 1095, 1211, 1536 nm, respectively

3 实验装置和结果

3.1 实验装置

在双路飞秒激光的相干合成研究中, 根据模拟分析结果提出了利用近变换极限的基态孤子与自频移孤子合成的方法得到少周期飞秒脉冲输出。实验装置如图 2 所示。掺镱光纤飞秒激光系统^[21]作为飞秒激光源, 重复频率为 82 MHz, 脉冲宽度为 62 fs, 中心波长为 1040 nm, 该系统输出脉冲几乎为傅里叶变换极限, 为之后的非线性频率变换提供高质量的脉冲源。脉冲经分束片分成两路。一路利用全固光子带隙光纤进行

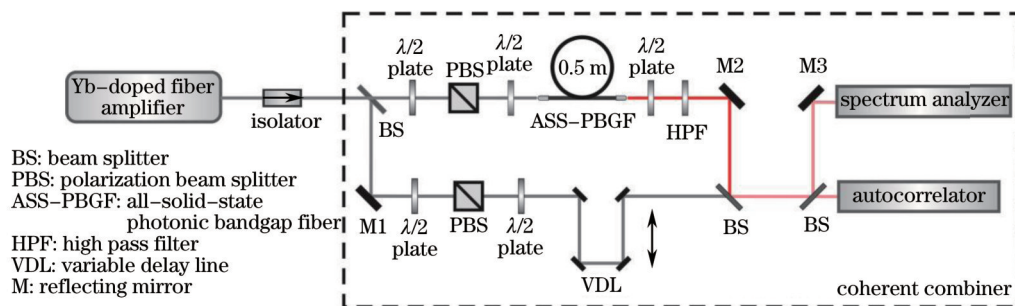


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

孤子频移,经由高通滤波片滤波后输出自频移孤子,另一路近变换极限的基态孤子,通过可变延迟线调整两路光时域上的相位延迟使其同步,通过宽带合束片在时空精确合成。两路脉冲分别经由一对半波片和偏振分束器来调整功率大小,光谱分析仪和自相关仪分别用来测量合成脉冲光谱和时域自相关曲线。

实验中使用一段 50 cm 长的自行设计并拉制(由华中科技大学拉制)的全固光子带隙光纤进行非线性频率变换,光纤传输曲线和种子源脉冲的处相关曲线如图 3 所示,光纤端面电子扫描显微图(SEM)如图 3(a)中插图所示。其包层是通过低折射率硅背景材料中置入 5 层掺锗高折射率棒构成的周期结构,包层的周期结构所形成的光子带隙效应能够将传输光局限在低折射率材料构成的纤芯中,高折射率棒直径为 $2\ \mu\text{m}$,间距为 $6\ \mu\text{m}$,纤芯有效模场面积达 $110\ \mu\text{m}^2$,远大于一般非线性光子晶体光纤($10\ \mu\text{m}^2$),大大增加了所能支持的孤子的能量。该光纤第一带隙为 $750\sim 1450\ \text{nm}$,零色散点在 $1040\ \text{nm}$ 附近,飞秒激光脉冲在其中传输可以形成自频移孤子。光纤两端通过宽带非球面透镜耦合脉冲的输入和输出,高通滤波器保证只有自频移孤子参与相干合成。

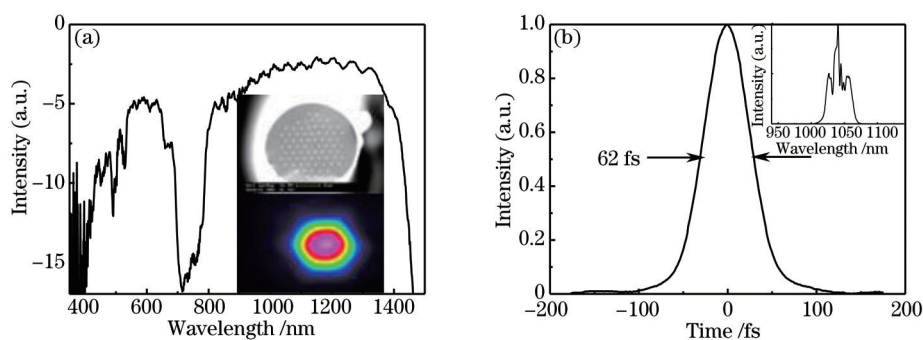


图 3 (a) 实验所用的全固光子带隙光纤的传输曲线(对数坐标),插图分别为光纤端面电子扫描显微图和光束质量分析仪测量得到的光纤输出端的模场分布;(b) 种子源脉冲的自相关曲线,插图为脉冲光谱

Fig.3 (a) Transmission spectrum (on the logarithmic scale) of the all-solid-state photonic band-gap fiber with the cross-sectional structure and fiber scanning electron micrograph figure and mode field distribution of the output end of the optical fiber measured by beam quality analyzer shown in the inset;(b) temporal autocorrelation trace and spectral trace (shown in the inset) of the seed pulse

3.2 实验结果

利用光谱仪测量了不同平均功率飞秒脉冲在全固光子带隙光纤中进行非线性频率变换后输出光谱,结果如图 4 所示。输出光谱中有明显的孤子自频移现象,并随着入射功率的增加,自频移孤子的中心波长向长波长移动。当功率超过一定阈值时,由于光子带隙长波边界的作用,自频移孤子中心波长稳定在 $1250\ \text{nm}$ 以内,这一效应降低了自频移孤子的中心波长对入射脉冲能量的敏感性。

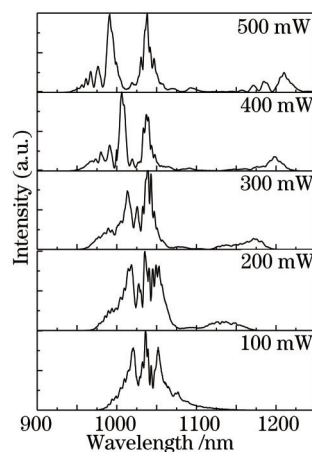


图 4 输出光谱随入射功率变化

Fig.4 Evolution of the output spectrum with different input powers

为了分析输出自频移孤子的时域和频域特性,实验中利用自相关仪、光谱仪测量了 $200\ \text{mW}$ 飞秒激光的自频移孤子的干涉自相关曲线和光谱曲线,如图 5(b)、(e)所示。获得的自频移孤子中心波长为 $1150\ \text{nm}$,脉冲宽度为 $55\ \text{fs}$,平均功率为 $20\ \text{mW}$,脉冲质量较好,接近变换极限,调整基态孤子平均功率为 $20\ \text{mW}$,经分束器后平均

功率为 15 mW,调整自由空间基态孤子的平均功率,使其经过分束器后与自频移孤子脉冲的平均功率相同,将两路脉冲相干合成后平均功率为 30 mW。形成少周期飞秒激光脉冲,其自相关曲线如图 5(c)所示,仅包含 4 个光学周期,脉冲宽度为 14 fs,光谱曲线如图 5(f)所示,可以看出合成后脉冲宽度由几十飞秒变为 10 fs 量级,合成效果明显。但是由于自频移孤子和自由空间基态孤子光谱宽度有限,并有一定间隔,合成后在主脉冲一侧有一定子脉冲,而且由于两路光脉冲的光谱之间没有交叠,所以没有明显的光谱干涉条纹出现。

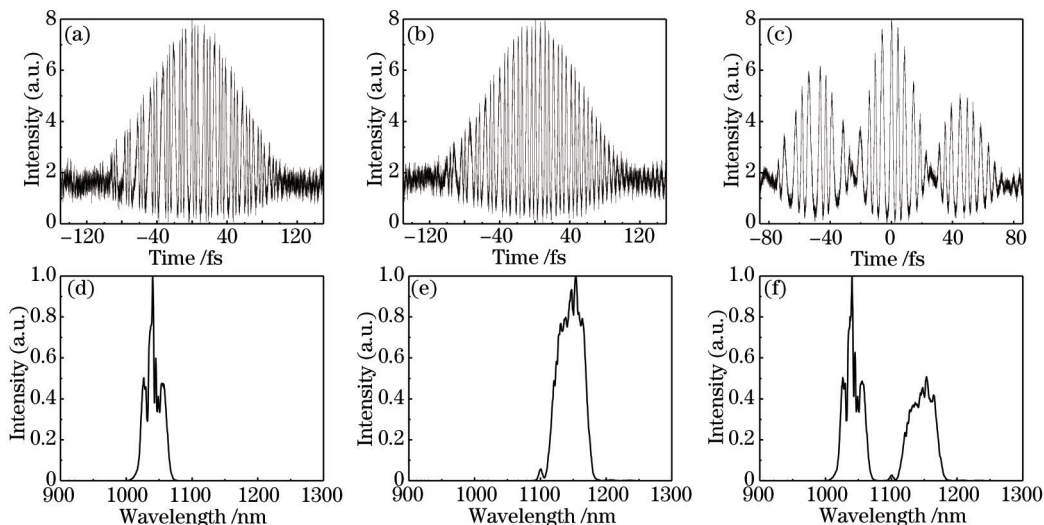


图 5 (a) 基态孤子干涉自相关曲线; (b) 自频移孤子的干涉自相关曲线; (c) 相干合成后的脉冲干涉自相关曲线; (d) 基态孤子光谱; (e) 自频移孤子光谱; (f) 相干合成后的脉冲光谱曲线

Fig.5 (a) Autocorrelation trace of the fundamental soliton pulse; (b) autocorrelation trace of the self-frequency-shifted soliton; (c) autocorrelation trace of the synthesized pulse; (d) spectrum of the fundamental soliton pulse; (e) spectrum of the self-frequency-shifted soliton; (f) spectrum of the synthesized pulse

不同延迟下合成结果的干涉自相关曲线如图 6 所示。图 6(c)、(b)、(a)中所示干涉自相关曲线的延迟逐渐增大,其中图 6(c)为延迟为零时的干涉自相关曲线,此时自频移孤子脉冲的时域中心与空间基态孤子的时域中心恰好干涉最强,相干叠加效果最明显,其幅值高于延迟非零的情况。由于延迟线控制精度的限制,无法得到更加明显的干涉结果,相干合成后主峰与子峰的对比度没有随着延迟的减小而明显增加。在今后的实

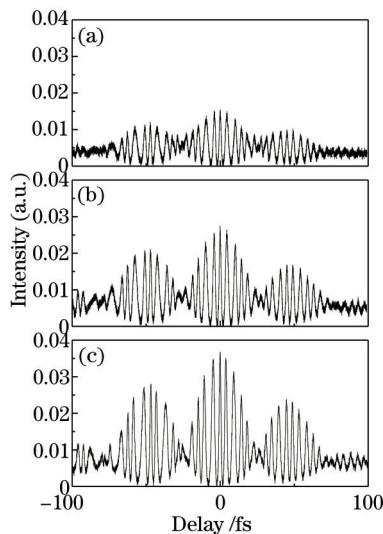


图 6 基态孤子与自频移孤子在不同时间延迟下相干合成的自相关曲线[从图(a)至图(c)两个孤子脉冲之间的延迟逐渐减小,图(c)为合成后脉冲零延迟位置]

Fig.6 Autocorrelation trace of the synthesized pulses for different time delays between the fundamental soliton and the self-frequency-shifted soliton [the time delays between the two solitons are decreased gradually from Fig.(a) to Fig.(c), and the time delay of the synthesized pulse in Fig.(c) is zero]

验中,采用高精度压电陶瓷控制延迟线位移,将能够观测到更加明显的干涉现象,合成后主峰幅值增加而子峰被抑制。在实验中,由于全固光子带隙光纤的采用和系统的优化,合成后的脉冲比较稳定,种子源的光强抖动对相干结果干扰很小,整体实验系统可以工作在没有任何功率反馈控制的自由运转状态。又因为输出的自频移孤子能量的大幅提升,相干合成后脉冲能量为 0.37 nJ,平均功率大于 30 mW,可以满足大多数生物光子学等应用的要求。

4 结 论

提出了利用全固光子带隙光纤进行非线性频率变换获得高能量自频移孤子,与原基态孤子进行相干合成获得少周期飞秒激光脉冲输出。在数值模拟的基础上,在实验中利用自行设计的全固光子带隙光纤实现了高能量自频移孤子输出,与另一路基态孤子合成后,获得了脉宽为 14 fs(包含 4 个光学周期)、平均功率大于 30 mW 的少周期超短脉冲输出。由于全固光子带隙光纤长波长边界的限制,输出自频移孤子中心波长稳定,对种子源脉冲强度抖动不敏感,保证了输出少周期飞秒脉冲的稳定性,是获得高功率、稳定的少周期飞秒脉冲的可行方案。今后可以进一步优化全固带隙光纤的参数和实验系统,可以获得更高平均功率的少周期量级超短脉冲输出。

参 考 文 献

- 1 Christov I P, Murnane M M, Kapteyn H C. High-harmonic generation of attosecond pulses in the "single-cycle" regime[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(7): 1251-1254.
- 2 Zheng Yinghui, Xiong Hui, Peng Yan, *et al.*. Generation of high-order harmonic continuum supporting single attosecond pulse in argon driven by intense 7 fs laser pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1439-1440.
郑颖辉,熊 辉,彭 滢,等. 7 fs 超快强激光驱动 Ar 原子产生支持单个阿秒脉冲的高次谐波连续谱[J]. *光学学报*, 2006, 26(9): 1439-1440.
- 3 Xi Peng, Zhou Chuanqing, Feng Xiaorui, *et al.*. Multiphoton microscopy with 10 fs pulse in biomedical imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s1): 46-49.
席 鹏,周传清,封晓瑞,等. 10 fs 脉冲在多光子激发生物成像中的应用[J]. *光学学报*, 2009, 29(s1): 46-49.
- 4 Horton N G, Wang K, Kobat D, *et al.*. *In vivo* three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 205-209.
- 5 Polli D, Antognazza M R, Brida D, *et al.*. Broadband pump-probe spectroscopy with sub-10-fs resolution for probing ultrafast internal conversion and coherent phonons in carotenoids[J]. *Chemical Physics*, 2008, 350(1-3): 45-55.
- 6 Chen L M, Liu F, Wang W M, *et al.*. Intense high-contrast femtosecond K-shell X-ray source from laser-driven Ar clusters[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(21): 215004.
- 7 Yu Benhai, Li Yingbin, Li Fangtao. Nonsequential double ionization of Xe atoms by elliptically polarized few-cycle laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0602001.
余本海,李盈宾,李方涛. 少光周期的椭圆偏振激光脉冲驱动的氙原子非次序双电离[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0602001.
- 8 Bai Ya, Xu Rongjie, Song Liwei, *et al.*. Study on THz emission from plasma filament driven by few-cycle laser pulses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080004.
白 亚,许荣杰,宋立伟,等. 周期量级激光脉冲激发等离子体产生太赫兹辐射研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080004.
- 9 Fork R L, Cruz C H, Becker P C, *et al.*. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(7): 483-485.
- 10 Brida D, Cirmi G, Manzoni C, *et al.*. Sub-two-cycle light pulses at 1.6 μm from an optical parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 741-743.
- 11 Demmler S, Rothhardt J, Heidt A M, *et al.*. Generation of high quality, 1.3 cycle pulses by active phase control of an octave spanning supercontinuum[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20151-20158.
- 12 Rausch S, Binhammer T, Harth A, *et al.*. Controlled waveforms on the single-cycle scale from a femtosecond oscillator[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9739-9745.
- 13 Song Zhenming, Ma Qian, Sun Yajuan, *et al.*. Study on the optimum condition for spectrum compression of the intense ultrashort pulses by cascaded hollow fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s132001.

- 宋振明, 马 茜, 孙亚娟, 等. 超强飞秒脉冲在分段中空光波导中脉冲压缩最优化的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s132001.
- 14 Shelton R K, Ma L S, Kapteyn H C, *et al.*. Phase-coherent optical pulse synthesis from separate femtosecond lasers[J]. Science, 2001, 293(5533): 1286-1289.
- 15 Zhang Zhigang. Femtosecond Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 315-322.
张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 315-322.
- 16 Ma F, Liu H, Huang N, *et al.*. Generation of single-cycle mid-infrared pulses via coherent synthesis[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28455-28464.
- 17 Stefan Eggert, Guather Krauss, Sebastian Lohss. Synthesis of a single cycle of light with compact erbium-doped fibre technology[J]. Nature Photonics, 2009, 4(1): 33-36.
- 18 Adler F, Sell A, Sotier F, *et al.*. Attosecond relative timing jitter and 13 fs tunable pulses from a two-branch Er: fiber laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(24): 3504-3506.
- 19 Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, *et al.*. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. Optics Letters, 2002, 27(18): 1592-1594.
- 20 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.
- 21 Wang Sijia, Gu Chenglin, Liu Bowen, *et al.*. Fast self-similar amplification through passive nonlinear pulse pre-shaping[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 140601.
王思佳, 顾澄琳, 刘博文, 等. 利用非线性脉冲预整形实现脉冲快速自相似放大[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 140601.
- 22 G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Fiber Optics 2nd[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Wang Zhaoying, *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 31-35.
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用第二版[M]. 贾东方, 余震虹, 王肇颖, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 31-35.
- 23 Voronin A A, Fedotov I V, Fedotov A B, *et al.*. Spectral interference of frequency-shifted solitons in a photonic-crystal fiber[J]. Optics Letters, 2009, 34(5): 569-571.

栏目编辑: 史 敏