

光学学报

基于超连续谱的可调谐同步脉冲产生及噪声分析

王庆婷¹, 杨康文^{1*}, 沈悦¹, 陈旭¹, 郝强¹, 黄坤², 曾和平^{1,2,3,4}

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;

³华东师范大学重庆研究院, 重庆 401121;

⁴济南量子技术研究院, 山东 济南 250101

摘要 实验研究了基于超连续谱滤波的可调谐双色同步皮秒脉冲产生技术, 将全保偏掺铒锁模光纤激光器输出的脉冲分为两路, 其中一路耦合到高非线性光纤, 获得了覆盖掺镱光纤发射谱带的超连续谱, 通过结合窄带可调谐滤波器和全保偏掺镱放大器, 实现了平均功率为 70 mW, 脉冲宽度为 4.0 ps, 中心波长为 1025~1055 nm 的可调谐脉冲。掺铒光纤激光器的另一路输出光经过窄带滤波器和掺铒光纤放大器, 实现了中心波长为 1580 nm, 平均功率为 200 mW, 脉冲宽度为 4.2 ps 的激光输出。上述基于超连续谱滤波的可调谐双色皮秒脉冲具有良好的同步特性, 可以作为相干反斯托克斯拉曼散射的泵浦光和斯托克斯光。研究发现, 选取超连续谱平坦位置的光谱成分作为掺镱放大器的种子光时, 脉冲幅值及平均功率抖动更小, 相对强度噪声更低。

关键词 光谱学; 超连续谱产生; 相干反斯托克斯拉曼散射; 激光同步

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0336001

Generation and Noise Analysis of Tunable Synchronized Pulse Based on Supercontinuum

Wang Qingting¹, Yang Kangwen^{1*}, Shen Yue¹, Chen Xu¹,

Hao Qiang¹, Huang Kun², Zeng Heping^{1,2,3,4}

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

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

³Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121, China;

⁴Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan, Shandong 250101, China

Abstract A tunable dual-color synchronized picosecond pulse generation technique based on supercontinuum filtering is experimentally studied. The output pulse of an all-polarization-maintaining Er-doped fiber laser is divided into two channels, one of which is coupled to the highly nonlinear fiber, and the supercontinuum covering the emission band of Yb-doped fiber is obtained. With the combination of a narrow-band tunable filter with an all-polarization-maintaining Yb-doped amplifier, a tunable laser output with average power of 70 mW, pulse duration of 4.0 ps, and central wavelength of 1025–1055 nm is achieved. The other output of the Er-doped fiber laser passes through the narrow-band filter and the Er-doped fiber amplifier to generate a laser output with average power of 200 mW, pulse duration of 4.2 ps, and central wavelength of 1580 nm. The above tunable two-color picosecond

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-01; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(11974248)、国家重大科研仪器研制项目(61927813)、上海市科技创新行动计划(18JC1412000)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划

* E-mail: kangwenyang@yeah.net

pulse based on supercontinuum filtering possesses good synchronization characteristics and can be used as pump light and Stokes light for coherent anti-Stokes Raman scattering. It is found that the fluctuations of pulse amplitude and average power are smaller and the relative intensity noise is lower when the spectral components at flat positions of supercontinuum are selected as the seed light of the Yb-doped amplifier.

Key words spectroscopy; supercontinuum generation; coherent anti-Stokes Raman scattering; laser synchronization
OCIS codes 300.6420; 290.5860; 140.3600; 140.3425

相干反斯托克斯拉曼散射成像是一种基于四波混频效应的三阶非线性光学过程,因其具有无标记、非侵入的特点,在生物样品分析、癌细胞识别和药代动力学领域有着广泛的应用^[1-3]。相干反斯托克斯拉曼散射成像要求泵浦光和斯托克斯光满足时间同步、空间重合和频差可调等条件,最早这些条件是采用两台同步的钛宝石固体光源或倍频掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)激光器同步泵浦的光学参量振荡器来实现的^[4-5]。但是固体光源体积庞大、结构复杂,极大地限制了相干反斯托克斯拉曼散射技术的应用。相比之下,光纤激光器体积小、重量轻、光束质量好,应用潜力巨大。目前已经发展出基于孤子自频移^[6-7]、光纤超连续谱展宽^[8-10]、四波混频^[11-13]和主/被动同步技术^[14-16]的光纤式相干拉曼散射光源技术。

孤子自频移技术生成的光谱较宽,限制了成像的频谱分辨率^[6];四波混频技术得到的光源重复频率一般较低,限制了成像的速度^[13];主动同步技术依赖精密的电子反馈技术,系统复杂^[15];被动同步技术需要在谐振腔内加入滤波器以实现调谐,存在振荡器失锁的风险^[16]。基于超连续谱展宽技术的光源具有光谱宽、全光纤易于集成等特点。本文基于该技术,利用非线性效应和群速度色散的相互作用

制备了百纳米级的光谱,结合基于光栅(G, grating)的空间滤波器实现了光谱的窄化和波长的调谐,采用全保偏结构提高了光路的稳定性和系统的抗外界干扰性,并对超连续谱的稳定性及噪声大小进行了研究和分析。

实验的装置图如图 1 所示,WDM 为波分复用器,LD 为激光二极管,ISO 为隔离器,AMP 为功率放大模块,BPF 为带通滤波器,Col 为准直器,HNLF 为高非线性光纤,HWP 为半波片,TM 为可旋转反射镜,SCG 为超连续谱产生,SF 为空间滤波器,DM 为二向色镜,BS 为光束分束器,M₁~M₆ 为反射镜,L₁~L₆ 为聚焦透镜,CH 为示波器的通道。掺铒光纤振荡器(EDFO)使用可饱和吸收体(SESAM)作为被动锁模器件,输出脉冲的重复频率为 60 MHz,中心波长为 1565.9 nm,半峰全宽为 7.5 nm。将振荡器的输出脉冲分为两路,第一路光脉冲首先在掺铒放大器(EDFA)中进行功率放大和光谱展宽,输出光谱展宽到 1585 nm。再使用带通滤波器(波长为 1510~1590 nm,带宽约为 1 nm)对展宽后的光谱进行光谱滤波,滤波后(功率约为 2 mW,波长为 1580 nm)的光脉冲再次注入到掺铒放大器中,功率提升至 200 mW,光谱展宽至 2.4 nm,如图 2(a)所示,在该输出功率下,自相关仪测得的

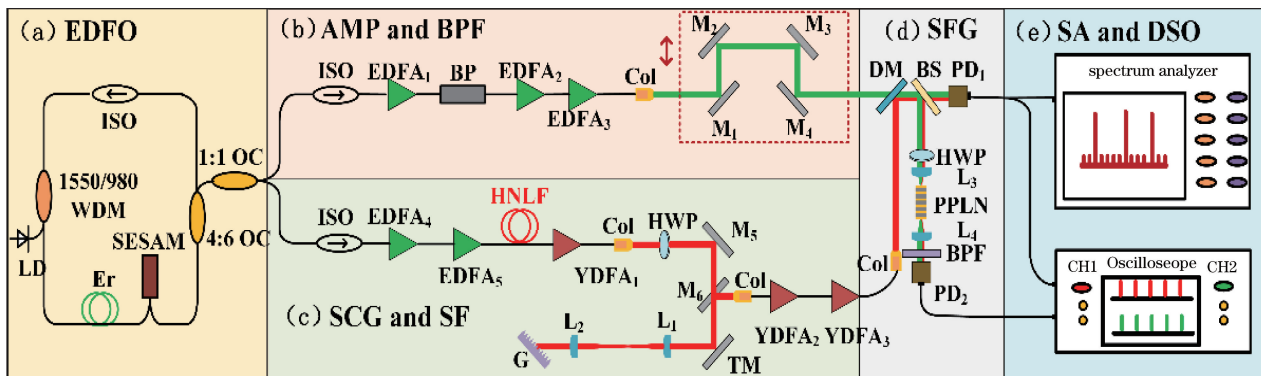


图 1 实验装置图。(a)掺铒光纤振荡器;(b)1580 nm 放大和窄带滤波;(c)超连续谱产生和空间滤波;(d)和频产生;(e)数字存储示波器和频谱分析仪

Fig. 1 Experimental setup. (a) Er-doped fiber oscillator; (b) amplification and narrowband filtering at 1580 nm; (c) supercontinuum generation and spatial filtering; (d) sum-frequency generation; (e) digital storage oscilloscope and spectrum analyzer

脉冲宽度为 4.2 ps。选择 1580 nm 光谱成分的原因是它经倍频后可获得 790 nm 的脉冲光,该脉冲光与掺镱放大光路中的 1020 nm 和 1028 nm 脉冲光满足探测脂质(波数为 2850 cm^{-1})和蛋白质(波数为 2930 cm^{-1})拉曼光谱特征峰的波数要求。第二路光脉冲经过掺铒放大器后,功率被放大至 150 mW,然后通过保偏单模光纤[色散参量 $D = 17\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$],脉冲宽度被压缩至 100 fs,最后注入到 40 cm 的高非线性光纤[色散参量 $D = 1.57\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,色散斜率为 $0.025\text{ ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$]中。拉曼散射导致孤子自频移向长波方向展宽光

谱,相位匹配条件下的四波混频过程及群速度匹配条件下孤子对色散波的捕获导致了光谱向短波方向展宽^[10]。通过改变注入脉冲的泵浦功率控制光谱,最终产生了短波波长为 1020 nm 的超连续谱,展宽前后的光谱以及超连续谱的仿真光谱分别如图 2(b)、(c)所示。结合一级掺镱放大器(YDFA)和可调谐窄带空间滤波装置对光谱成分进行放大滤波,获得了光波长在 1025~1055 nm 范围内的可调谐的种子光,如图 2(d)所示。选取中心波长为 1030 nm 的光脉冲作为种子光,经过两级掺镱放大器后,功率可达到 70 mW,脉冲宽度为 4.0 ps。

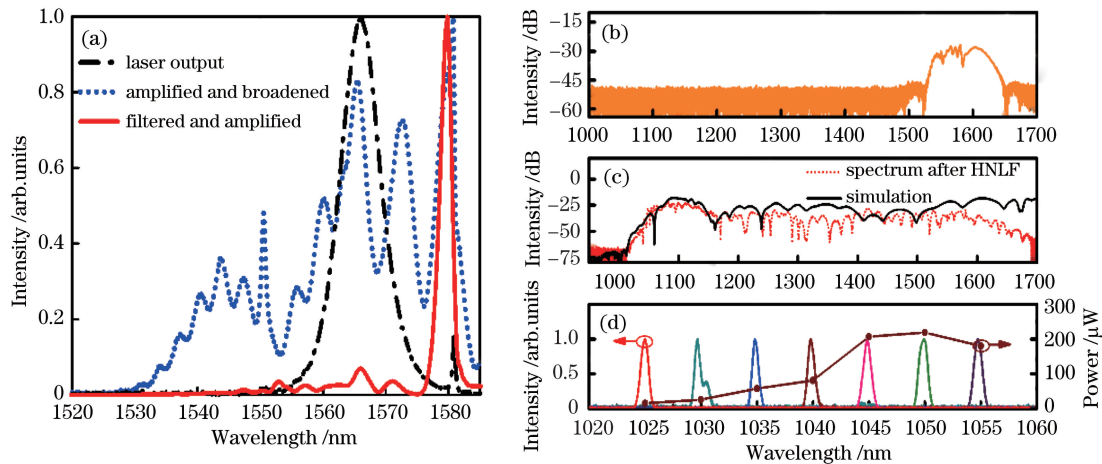


图 2 光谱图。(a)三种情况下的光谱;(b)进入高非线性光纤之前的光谱;(c)经过高非线性光纤后的实测光谱以及仿真光谱;(d)种子光波长的调谐范围和功率值

Fig. 2 Spectra .(a) Spectra in three cases; (b) spectrum before HNLF; (c) measured and simulated spectra after HNLF; (d) wavelength tuning range and power of seed light

超连续谱滤波放大后的脉冲强度稳定性影响相干拉曼散射信号的稳定性,尤其是受激拉曼散射,其对光源的强度噪声更为敏感。实验选取中心波长为 1030 nm 的光脉冲作为研究对象,通过改变注入脉冲的泵浦功率,分别使 1030 nm 的光脉冲位于超连续谱的平坦区域和陡峭区域,如图 3(a)、(b)所示;采用数字存储示波器(DSO, Digital storage oscilloscope)分别记录上述两种情况下的电脉冲轨迹,如图 3(c)、(d)所示;分别对两种情况下的 1000 个电脉冲样本的归一化幅值大小进行统计并绘制直方图^[17],如图 3(e)、(f)所示。可以看出,当 1030 nm 处的光谱比较平坦时,脉冲轨迹的幅值起伏较小,幅值主要集中在 0.93 附近,均方差(std)值为 0.023;当光谱陡峭时,脉冲轨迹的幅值起伏较大,主要集中在 0.80~0.85 范围内,均方差值为 0.067,是前者的 3 倍左右。故光谱平坦处的脉冲信号幅值起伏比陡峭处小,光谱分布更为集中,信号更加稳定。

为了进一步证实上述结论,实验测量了脉冲平均功率的长期稳定性。选取中心波长为 1580 nm 的种子光及超连续谱平坦区域和陡峭区域中心波长为 1030 nm 的种子光,分别记录了三束种子光放大后的光功率在 30 min 内的浮动情况,结果如图 4(a)~(c)所示。三束种子光的功率均方差分别为 0.041, 0.094, 0.393 mW,故由超连续谱展宽获得的 1030 nm 光脉冲的功率长期稳定性相比 1580 nm 稍差,这是由超连续谱展宽过程中各种非线性效应导致的相干性退化引起的^[16]。对于超连续谱自身而言,其平坦处种子光放大后光功率的稳定性优于陡峭处。

为了测量脉冲的相对强度噪声(RIN)值,将 1580 nm 光脉冲和超连续谱平坦、陡峭处 1030 nm 光脉冲的功率均衰减到 4.5 mW 后分别用频谱仪(SA, Spectrum analyzer)进行测量。参照参考文献^[18]中的计算方法,首先计算理论散粒噪声强度

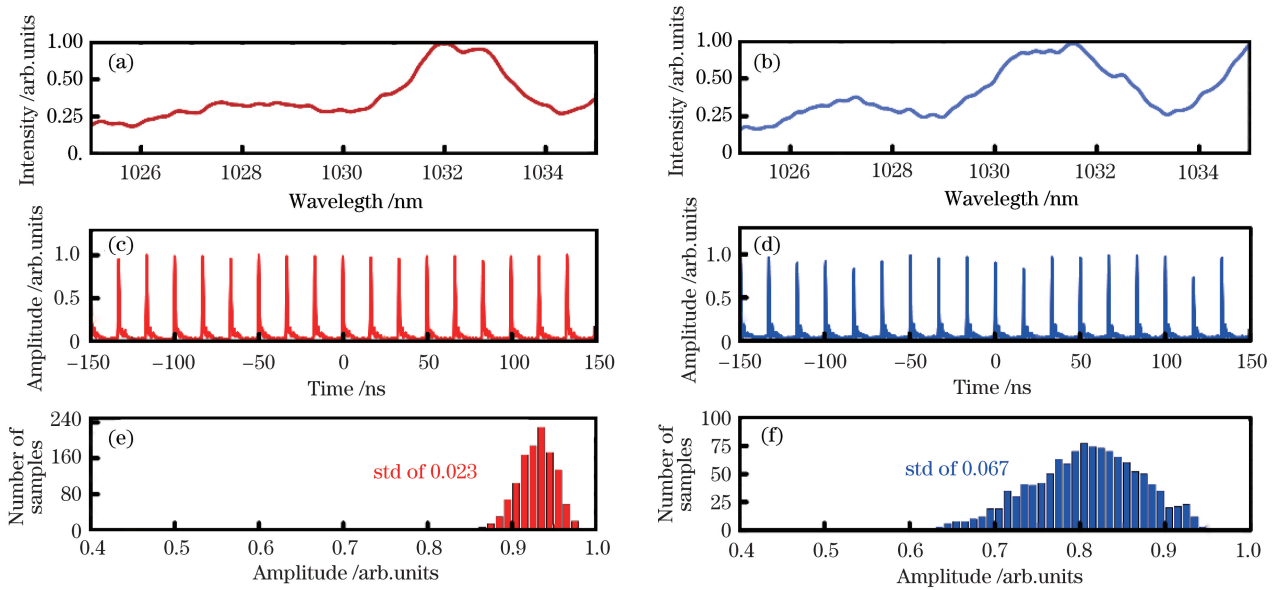


图 3 光谱区域选取与稳定性分析。(a) 1030 nm 处平坦的光谱;(b) 1030 nm 处陡峭的光谱;(c)示波器记录的超连续谱平坦处 1030 nm 光信号的电脉冲轨迹;(d)示波器记录的超连续谱陡峭处 1030 nm 光信号的电脉冲轨迹;(e)超连续谱平坦处 1030 nm 光信号电脉冲幅值的分布;(f)超连续谱陡峭处 1030 nm 光信号电脉冲幅值的分布

Fig. 3 Spectrum region selection and stability analysis. (a) Spectrum at 1030 nm is flat; (b) spectrum at 1030 nm is steep; (c) electrical pulse trace of 1030 nm optical signal at flat position of supercontinuum recorded by oscilloscope; (d) electrical pulse trace of 1030 nm optical signal at steep position of supercontinuum recorded by oscilloscope; (e) electrical pulse amplitude distribution of 1030 nm optical signal at flat position of supercontinuum; (f) electrical pulse amplitude distribution of 1030 nm optical signal at steep position of supercontinuum

与入射到探测器上的光功率的关系:

$$P_{\text{shot}} = \frac{qZ_T^2 G^2}{2R_{SA}} SP_{\text{PD}}, \quad (1)$$

式中: P_{shot} 为理论散粒噪声强度; q 是基本电荷; Z_T 是探测器(PD)的传输阻抗; G 是运算放大器的增益; S 是探测器的响应度; P_{PD} 是探测器上入射光的功率; R_{SA} 是频谱仪的输出电阻。将 $Z_T = 50 \Omega$, $R_{SA} = 50 \Omega$, $G = 11.2$, $S = 1.0 \text{ A/W}$ 代入(1)式,得到理论散粒噪声强度与探测器上入射光功率的关系为

$$P_{\text{shot}} = -153.0 + 10 \lg P_{\text{PD}}. \quad (2)$$

根据(2)式绘制理论散粒噪声水平曲线图,如图 4(d)所示。将 $P_{\text{PD}} = 4.5 \text{ mW}$ 代入(2)式,得 $P_{\text{shot}} = -146.4 \text{ dBm/Hz}$ 。然后,计算入射光产生的射频功率与探测器上入射光功率的关系:

$$P_{\text{inc}} = \frac{(V_{\text{inc}}/2)^2}{R_{SA}} = \frac{S^2 P_{\text{PD}}^2 R_L^2 G^2}{4R_{SA}}, \quad (3)$$

式中: P_{inc} 为入射光产生的射频功率; V_{inc} 是运算放大器的输出电压; $R_L = 50 \Omega$ 为负载电阻。将 $P_{\text{PD}} = 4.5 \text{ mW}$ 代入(3)式,得 $P_{\text{inc}} = 31.8 \text{ mW}$ 。最后计算出该光功率条件下的散粒噪声极限(RIN, R_1):

$$R_1 = \frac{P_{\text{shot}}}{P_{\text{inc}}} = -161.4 \text{ dBc/Hz}. \quad (4)$$

图 4(e)是三种情况下实际测得的相对强度噪声,在几十赫兹的低频段内,噪声主要是由谐振腔内光纤的振动、温度的涨落等外部环境的干扰引起的;在几百赫兹到几千赫兹的中频段内,由于泵浦源的波动,噪声出现了呈指数衰减的弛豫振荡;在几兆到几十兆赫兹的高频段内,噪声主要是由增益介质中的自发辐射引起的。锁模激光器的强度噪声受到环境波动、泵浦源噪声和自发辐射噪声的共同影响,整体比理论噪声水平高^[19]。对比三者的噪声水平曲线可知,1030 nm 光脉冲的相对强度噪声整体比 1580 nm 光脉冲高 6 dB~10 dB,平坦处 1030 nm 光脉冲的相对强度噪声比陡峭处低 3 dB 左右。分析上述现象产生的原因,发现是泵浦功率的不稳定性、环境温度的变化以及振动等因素造成超连续谱在波长上存在着微小的抖动。因为谱带不同区域的斜率不同,当波长的变化量相同时,平坦区域光脉冲幅度的变化量更小,即脉冲更稳定。

为了定量评估双色脉冲同步的稳定性,依据光互相关技术测量了双色脉冲的时间抖动^[20]。如图 1 所示,将 1580 nm 和超连续谱平坦处的 1030 nm 光

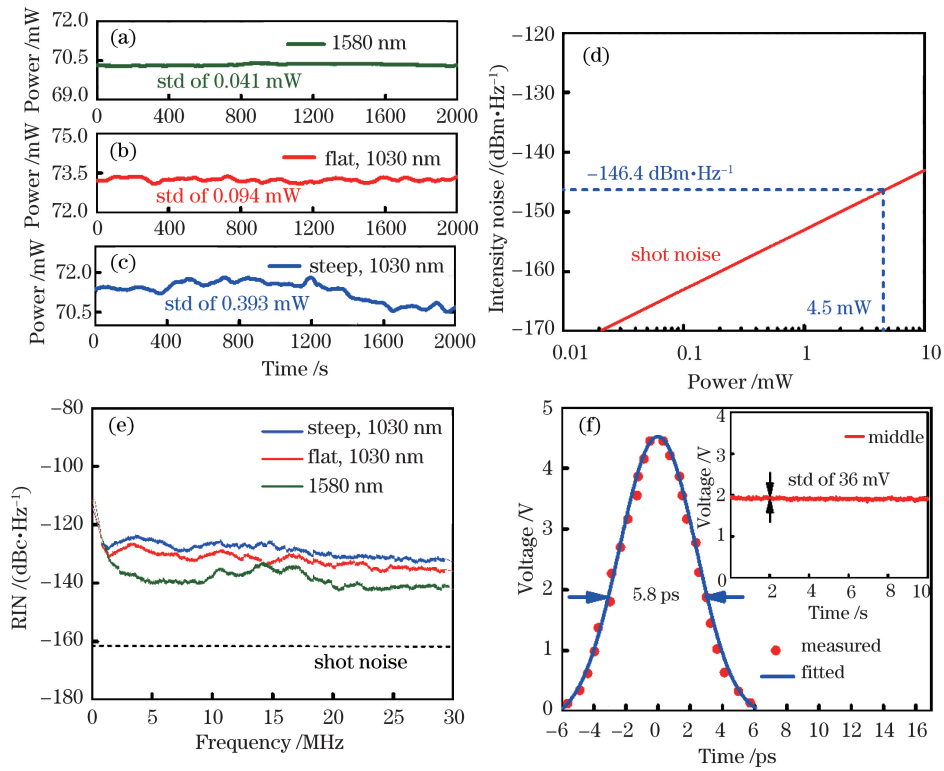


图 4 稳定性测量。(a)中心波长为 1580 nm 的种子光功率在 30 min 内的测量结果;(b)超连续谱平坦处中心波长为 1030 nm 的种子光功率在 30 min 内的测量结果;(c)超连续谱陡峭处中心波长为 1030 nm 的种子光功率在 30 min 内的测量结果;(d)理论强度噪声与光功率的关系;(e)实测的脉冲的相对强度噪声值;(f)同步双色脉冲的互相关轨迹以及轨迹中间处电压值的变化

Fig. 4 Stability measurement. (a) Measured power of seed light with central wavelength of 1580 nm within 30 min; (b) measured power of seed light with central wavelength of 1030 nm at flat position of supercontinuum within 30 min; (c) measured power of seed light with central wavelength of 1030 nm at steep position of supercontinuum within 30 min; (d) relationship between theoretical intensity noise and optical power; (e) measured relative intensity noise value of pulses; (f) cross-correlation trace of synchronized two-color pulse and variance of voltage in middle of trace

脉冲聚焦到一块周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)中以产生和频信号(SFG)。使用光电探测器将产生的和频信号转化为电信号,滤波放大后再接到示波器上进行后续分析。利用 1580 nm 滤波放大光路中的线性平移装置改变双色脉冲的时间重叠,示波器上的电压值变化情况如图 4(f)所示。对数据进行拟合后,得到的双色脉冲的互相关带宽约为 5.8 ps。然后,测量了互相关轨迹中点处电压值的波动情况,如图 4(f)中的插图所示。中点处电压值变化量的均方差是 36 mV,由于互相关轨迹的斜率约为 0.96 V/ps,故得到的定时抖动上限约为 37.5 fs,远远小于互相关带宽,说明双色脉冲具有良好的同步稳定性。

综上所述,基于超连续谱展宽原理获得了中心波长为 1025~1055 nm 的可调谐脉冲,该脉冲与振荡器输出的中心波长为 1580 nm 的光脉冲具有良

好的同步特性,有望用于相干反斯托克斯拉曼散射的研究中。实验发现,种子光附近的超连续谱越平坦,放大后的光脉冲信号功率越稳定,相对强度噪声值越低。为了减小由超连续谱形状不规则引入的噪声,可使用色散渐减光纤获得大带宽的平坦超连续谱,以减小波长调谐过程中输出功率的抖动^[21]。为了进一步降低超连续谱引入的相对强度噪声并满足受激拉曼散射成像的要求,可通过光纤拉锥的方法引入另一个零色散波长以减小长波长处的噪声,该方法有望为受激拉曼散射提供更稳定的光源^[22]。

参 考 文 献

[1] Zhang B H, Guo L, Yao L, et al. Rapid histological imaging using stimulated Raman scattering microscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207018. 张博涵, 郭莉, 姚冽, 等. 受激拉曼散射显微技术用

- 于快速无标记病理成像[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207018.
- [2] Li Z L, Li S W, Zhang S L, et al. Coherent Raman scattering microscopy technique and its biomedical applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207005.
李姿霖, 李少伟, 张思鹭, 等. 相干拉曼散射显微技术及其在生物医学领域的应用[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207005.
- [3] Yin J, Lin Z Y, Qu J L, et al. Coherent anti-stokes Raman scattering microscopic imaging technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(10): 2477-2484.
尹君, 林子扬, 屈军乐, 等. 相干反斯托克斯拉曼散射显微成像技术[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2477-2484.
- [4] Forget S, Balembos F, Lucas-Leclin G, et al. Picosecond laser source at 1 MHz with continuous tunability in the visible red band[J]. Optics Communications, 2003, 220(1/2/3): 187-192.
- [5] Evans C L, Xie X S. Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy: chemical imaging for biology and medicine[J]. Annual Review of Analytical Chemistry, 2008, 1(1): 883-909.
- [6] Andresen E R, Birkedal V, Thøgersen J, et al. Tunable light source for coherent anti-Stokes Raman scattering microspectroscopy based on the soliton self-frequency shift [J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1328-1330.
- [7] Kong D F, Jia D F, Feng D J, et al. Soliton self-frequency shift in optical fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101902.
孔德飞, 贾东方, 冯德军, 等. 光纤中的孤子自频移效应[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101902.
- [8] Freudiger C W, Yang W L, Holtom G R, et al. Stimulated Raman scattering microscopy with a robust fibre laser source[J]. Nature Photonics, 2014, 8(2): 153-159.
- [9] Gambetta A, Kumar V, Grancini G, et al. Fiber-format stimulated-Raman-scattering microscopy from a single laser oscillator [J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 226-228.
- [10] Zhang H, Wang Y, Chang S J. Blue-shifted spectra of supercontinuum generation in photonic crystal fibers [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(11): 1938-1942.
张会, 王伟, 常胜江. 光子晶体光纤中超连续谱产生的蓝移光谱分析 [J]. 光子学报, 2010, 39(11): 1938-1942.
- [11] Chemnitz M, Baumgartl M, Meyer T, et al. Widely tuneable fiber optical parametric amplifier for coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26583-26595.
- [12] Zheng S K, Yang K W, Ao J P, et al. Advances in fiber laser sources for coherent Raman scattering microscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508008.
郑世凯, 杨康文, 敖建鹏, 等. 光纤式相干拉曼散射成像光源研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508008.
- [13] Yang K W, Zheng S K, Ye P B, et al. Fiber-based optical parametric oscillator with flexible repetition rates by rational harmonic pumping[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 4897-4906.
- [14] Yang K W, Shen Y, Ao J P, et al. Passively synchronized mode-locked fiber lasers for coherent anti-Stokes Raman imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 13721-13730.
- [15] Ozeki Y, Kitagawa Y, Sumimura K, et al. Stimulated Raman scattering microscope with shot noise limited sensitivity using subharmonically synchronized laser pulses[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13708-13719.
- [16] Kong C H, Pilger C, Hachmeister H, et al. High-contrast, fast chemical imaging by coherent Raman scattering using a self-synchronized two-colour fibre laser[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 1-12.
- [17] Kudlinski A, Barviau B, Leray A, et al. Control of pulse-to-pulse fluctuations in visible supercontinuum [J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27445-27454.
- [18] Yoshimi H, Sumimura K, Ozeki Y. An Er fiber laser generating multi-milliwatt picosecond pulses with ultralow intensity noise[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(10): 108001.
- [19] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(3): 465-540.
- [20] Huang K, Zeng J, Gan J W, et al. Passive all-optical synchronization for polarization-maintaining mode-locked fiber lasers[J]. Optics Express, 2018, 26(24): 32184-32193.
- [21] Xu Y Z, Wei Y F, Ren X M. Broadband supercontinuum generation in a dispersion-flattened and decreasing PCF[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(2): 194-199.
徐永钊, 卫艳芬, 任晓敏. 利用色散平坦渐减 PCF 产生宽带超连续谱 [J]. 半导体光电, 2009, 30(2): 194-199.
- [22] Engelsholm R D, Bang O. Supercontinuum noise reduction by fiber undertapering[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 10320-10331.