

用于CARS激发源的全光纤窄线宽皮秒脉冲种子源的研究

江俊峰¹ 郭洪龙¹ 刘铁根¹ 刘琨¹ 王辉^{1,2}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室,天津大学光纤传感研究所,天津 300072

²河北师范大学物理科学与信息工程学院,河北 石家庄 050024

摘要 进行了窄线宽、低重复频率和无色散管理的全光纤皮秒脉冲种子源的研究。数值仿真分析了腔内脉冲的演化过程,研究了腔长和光纤光栅带宽对脉冲稳定性和脉冲宽度的影响。搭建实验系统,对腔长和抽运功率的影响进行了实验研究,在腔长为24.1 m时,成功产生86 ps的稳定光脉冲,其线宽为0.04 nm,重复频率为4.3 MHz。当将此脉冲放大用于相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)光谱探测,理论光谱分辨率可达 0.3 cm^{-1} 。

关键词 光纤光学;皮秒脉冲;掺镱光纤激光器;相干反斯托克斯拉曼散射

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0205004

Research on All-Fiber Narrow Bandwidth Picosecond Pulse Seed Source for CARS Excitation Source

Jiang Junfeng¹ Guo Honglong¹ Liu Tiegeng¹ Liu Kun¹ Wang Hui^{1,2}

¹*Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

²*College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China*

Abstract A picosecond pulse seed source with narrow bandwidth, low repetition rate and dispersion-management-free characteristics is studied. The intracavity pulse evolution is analyzed through numerical simulation. The influences of the cavity length and the fiber Bragg grating (FBG)'s bandwidth on the pulse stability and pulse duration are investigated. Experiment setup is established to carry out the experimental research on the effect of cavity length and pump power. When the cavity length is 24.1 m, a stable optical pulse with 86 ps pulse duration is obtained successfully, the bandwidth and the repetition rate of which are 0.04 nm and 4.3 MHz, respectively. When the pulse is amplified for coherent anti-Stokes Raman scattering(CARS) spectrum detection, the theoretical spectral resolution can be 0.3 cm^{-1} .

Key words fiber optics; picosecond pulse; Yb-doped fiber laser; coherent anti-Stokes Raman scattering

OCIS codes 060.2310; 060.3510; 180.5655

1 引 言

相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)成像技术通过分子振动能级而不是荧光染色探测出特定分子,是一种基于四波混频非线性效应的无标记光学探测方法,可以避免复杂的荧光标记处理及标记染料对探测样品造成的干扰影响,在活细胞、蛋白质结构、脂质膜等生物成像方面有着很好的应用前景^[1-5]。

收稿日期: 2014-08-18; 收到修改稿日期: 2014-09-18

基金项目: 国家973计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(61378043, 61227011, 61108070, 11004150)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)

作者简介: 江俊峰(1977—),男,博士,副教授,主要从事基于光纤CARS生物成像、光微流体生物传感、光纤传感、光电检测等方面的研究。E-mail: jiangjfjxu@tju.edu.cn

CARS激发源需要产生两束皮秒或者亚皮秒的同步脉冲光,分别用作抽运光和斯托克斯光,与特定分子振动能级作用,共振激发产生反斯托克斯探测信号。典型CARS激发源是利用钛宝石固体激光器或者倍频钕激光器结合光参量振荡器构成,但是这些系统复杂庞大,价格昂贵,且需要特殊的维护^[6-7]。为了获得结构紧凑、易维护的CARS激发源,研究人员基于光纤激光器提出了多种方法。Pegoraro等^[8]基于飞秒脉冲光纤激光器和孤子自频移机制产生可调谐的斯托克斯光,在利用HI1060单模光纤(SMF)和玻璃棒对飞秒脉冲时域展宽啾啾处理后,探测光谱分辨率达到 80 cm^{-1} 。Marangoni等^[9]将飞秒脉冲在高非线性光子晶体光纤中产生的超连续谱光作为斯托克斯光,同时采用周期极化钽酸锂晶体进行谱宽压缩处理,探测光谱分辨率达到 15 cm^{-1} 。飞秒脉冲的大光谱宽度限制了CARS光谱分辨率,利用其产生的斯托克斯光需要进行啾啾压缩谱宽处理。皮秒脉冲则能较好地克服这一问题,2012年Chemnitz等^[10]利用百皮秒脉冲在光子晶体光纤中的退化四波混频效应产生了可调谐斯托克斯光,通过同时引入辅助的连续输出的种子光,未经啾啾处理实现了 1 cm^{-1} 的探测光谱分辨率。此外,皮秒脉冲在光纤传输中由于色散和自相位调制等非线性作用导致的脉冲畸变相较于飞秒脉冲的小,易在光纤中实现稳定传输。

本文针对CARS激发源进行了窄线宽、低重复频率和无色散管理的全光纤皮秒脉冲种子源的研究。数值仿真分析了腔长和光纤光栅(FBG)带宽对脉冲稳定性和脉冲宽度的影响。搭建实验系统,成功产生 86 ps 的稳定光脉冲,线宽为 0.04 nm ,重复频率为 4.3 MHz ,时间带宽积为 0.9 。当将此脉冲放大用于CARS光谱探测,理论光谱分辨率可达 0.3 cm^{-1} 。

2 全光纤皮秒脉冲种子源的建模与理论分析

2.1 种子源模型

全光纤皮秒脉冲种子源输出脉冲宽度选取为百皮秒,可以具有窄线宽,从而提高CARS光谱分辨率和降低非共振背景噪声,同时也可使CARS激发源输出的抽运光和斯托克斯光脉冲容易实现时域重叠。CARS激发源输出激光脉冲热效应有可能对生物组织造成损伤,因此平均光功率不能过高,为了提高皮秒脉冲的峰值功率保证激发信号强度,需要以低脉冲重复频率工作。另一方面,较高的CARS激发脉冲重复频率可以获得较高的CARS成像速度^[6]。CARS激发源输出激光脉冲的脉冲重复频率取决于种子源,因此全光纤皮秒脉冲种子源脉冲重复频率选取为兆赫兹量级。

图1为全光纤皮秒脉冲种子源的结构图,采用线形腔,其中激光谐振腔由可饱和吸收体反射镜(SESAM)、窄带FBG和光纤组成,FBG用作反馈腔镜和输出端口,975 nm单模LD抽运光通过波分复用器(WDM)耦合进入腔内,腔内无色散补偿器件。连接光纤为标准HI1060光纤,窄带FBG的线宽为 0.04 nm ,增益光纤为Nufern公司的型号为SM-YSF-HI的掺镱光纤,它在975 nm处吸收率为 250 dB/m ;SESAM的工作中心波长 $\lambda_0=1064\text{ nm}$,调制深度 $\Delta R=25\%$,饱和通量为 150 J/cm^2 ,恢复时间 $\tau=9\text{ ps}$ 。

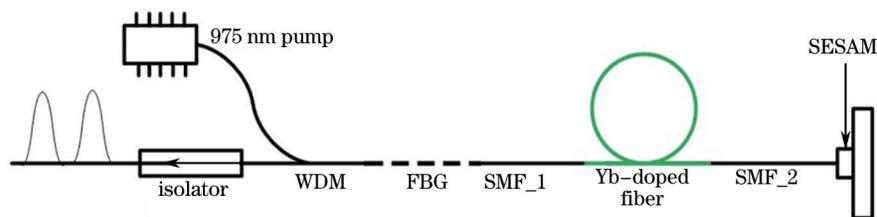


图1 全光纤皮秒脉冲种子源的结构示意图

Fig.1 Schematic setup of all-fiber picosecond pulse seed source

建立数值仿真模型如图2所示。仿真过程是在腔内任一位置加入一个噪声脉冲,然后噪声脉冲在腔内循环多次达到自再现,此时输出达到稳定。噪声脉冲加入位置不影响最终稳态解。

脉冲在光纤中传输演变的数值仿真通过求解非线性薛定谔方程实现,(1)式为非线性薛定谔方程,式中 A 为脉冲的慢变包络, z 是脉冲的传输位置坐标, t 是脉冲的时间量度, β_2 是群速度色散参量, T_2 是偶极子弛豫时间,与增益带宽成反比, γ 是非线性系数, g_0 是增益系数, $g_0 = g_{ss}(1 + P_s/P_s^{sat})^{-1}$, g_{ss} 是小信号增益, P_s^{sat} 为饱和功率, P_s 为信号光功率。 α_2 表示双光子吸收效应的损耗, α 对应传输损耗,在非掺镱光纤中传输时, $g_0=0$ 。(2)式

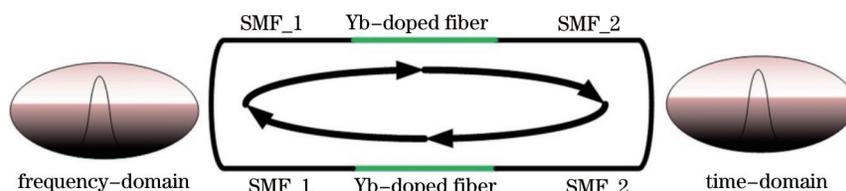


图2 全光纤皮秒脉冲种子源仿真原理图

Fig.2 Principle diagram of the simulation of all-fiber picosecond pulse seed source

用来表征 SESAM 对脉冲的作用, 式中 α_{ss} 为 SESAM 对光脉冲的基本损耗, P 为脉冲瞬时功率, P_{sa} 为饱和阈值。(3)式表征 FBG 对脉冲的作用, 式中 F 为一个向量, 代表整个频谱分量, $\Delta\nu$ 为 FBG 的反射线宽。

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}(\beta_2 + ig_0 T_2^2) \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i \left(\gamma + \frac{i}{2} \alpha_2 \right) |A|^2 A + \frac{1}{2}(g_0 - \alpha) A, \quad (1)$$

$$A_{out} = A_{in} \sqrt{1 - \frac{\alpha_{ss}}{1 + P/P_{sa}}}, \quad (2)$$

$$A_{out} = \text{IFFT}\{\text{FFT}(A_{in}) \exp[-0.5(|F|/\Delta\nu)^4]\}. \quad (3)$$

数值仿真参数为增益光纤长度 $l=0.75$ m, 非线性系数 $\gamma=0.00026$ W⁻¹/m, 二阶色散 $\beta_2=0.023$ ps²/m, $g_{ss}=3$ m⁻¹, 增益饱和能量 $E^{sat}=200$ pJ。连接光纤 SMF_1、SMF_2 的长度分别为 3.35 m 和 10 m, 初始噪声假定为 1 ps 的高斯脉冲噪声。采用上述参数进行数值计算并分析了全光纤皮秒脉冲种子源光脉冲在腔内演化的动力学过程。

2.2 种子源腔内脉冲演化过程

光脉冲在腔内锁模稳定后状态如图 3 所示。由图可知整个腔内脉冲强度不断变化, 即使在腔内同一位置, 不同传输方向的脉冲强度也不同。腔内光纤在工作波长 1064 nm 处表现为正常色散, 因此锁模形成机制为增益导引型耗散孤子类型^[11]。光脉冲在腔内的脉冲宽度半峰全宽(FWHM)演化如图 4 所示, SESAM 起到自启动锁模和脉冲压缩作用, 在经过 SESAM 前, 光脉冲宽度为 74.36 ps, 经过后, 光脉冲宽度为 66.54 ps。

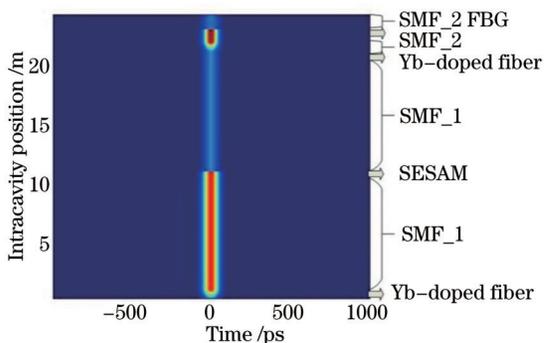


图3 腔内脉冲强度演化过程

Fig.3 Intracavity pulse intensity evolution

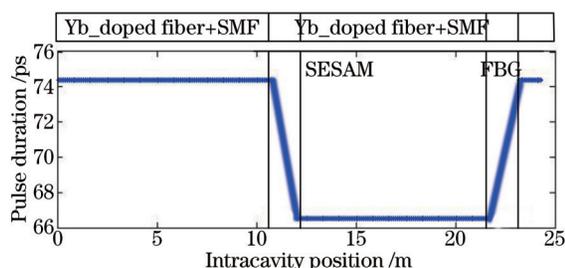


图4 腔内脉冲宽度演化过程

Fig.4 Intracavity pulse duration evolution

光脉冲经过窄线宽 FBG 后被滤波, 从而减小了自相位调制光谱展宽影响, 脉冲在频域上得到压缩, 在时域被展宽, 由 66.54 ps 变成 74.36 ps。窄带宽也使得色散对脉冲展宽影响较小, 所以在光纤传输过程中, 脉冲基本宽度保持不变。仿真稳定输出脉冲如图 5 所示, 可以看到光脉冲在时域跟频域都保持了较好的高斯轮廓, 输出的光脉冲宽度为 74.36 ps, 光谱宽度为 0.034 nm。

2.3 种子源的腔长和 FBG 线宽对输出光脉冲的影响

全光纤皮秒脉冲种子源工作在正常色散区, 需要尽量减少非线性相移累积, 因为当非线性相移累积大于 π 后, 锁模开始变得不稳定并出现多脉冲现象^[12]。非线性相移正比于腔长和峰值功率的乘积, 即 $\phi = \gamma P_p (2L)$, 式中 P_p 为峰值功率, L 为腔长。由于腔长和 FBG 线宽均会影响输出脉冲宽度及输出单脉冲能量, 因此利用建立的模型计算出不同腔长和 FBG 线宽下的种子源脉冲中最高非线性相移累积, 其中增益光纤长度为 0.75 m。图 6 为 FBG 线宽为 0.04 nm 时, 脉冲宽度和非线性相移随腔长的变化, 当腔长增加到

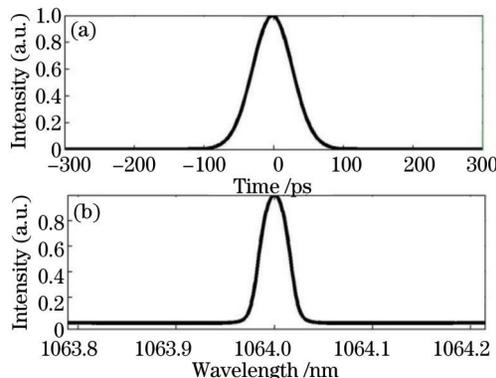


图5 仿真脉冲输出特性。(a) 时域特性; (b) 光谱特性

Fig.5 Simulated pulse output characteristics in (a) time domain; (b) spectral domain

25.68 m 时,非线性累积增加到 π ,继续增加腔长锁模将开始变得不稳定,出现脉冲分裂,图中用灰色标记。图7为腔长为 10 m 时,脉冲宽度和非线性相移随 FBG 线宽的变化,随着 FBG 线宽增加,非线性相移线性增加,这是由于线宽增加,相应脉宽会降低,并且单脉冲能量增加,导致脉冲峰值功率上升,进而 ϕ 增加。FBG 宽度为 0.078 nm 时, ϕ 达到 π ,锁模开始不稳定。

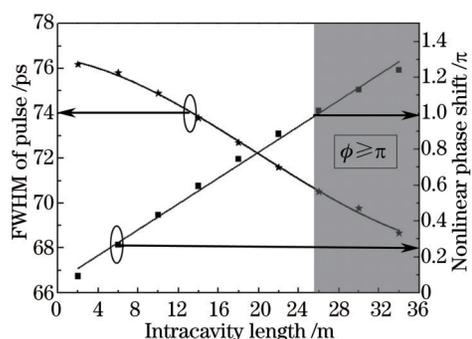


图6 输出脉冲宽度和非线性相移积累随腔长变化
Fig.6 Output pulse duration and nonlinear phase shift versus cavity length

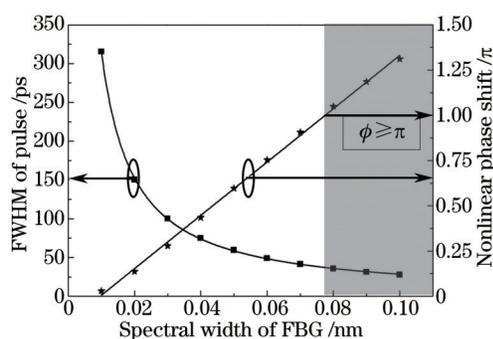


图7 输出脉冲宽度和非线性相移积累随 FBG 带宽变化
Fig.7 Output pulse duration and nonlinear phase shift versus FBG's spectral width

增加腔长有助于获取低重复频率脉冲,腔长增加导致非线性相移积累增加,可以通过减小窄带 FBG 或者采用调制深度深的 SESAM 配合低抽运功率来降低非线性相移积累,从而形成稳定锁模。要想得到更低的重复频率,可以通过激光腔外输出端加声光调制器等器件对脉冲选择输出来实现。针对本文所选仿真参数,当腔长为 10 m 时,激光器工作在兆赫兹量级,在给定条件下,要形成稳定锁模,FBG 带宽要小于 0.078 nm,但是当带宽小于 0.03 nm 后,脉冲宽度会迅速增加,要想达到高的峰值功率,单脉冲能量会过高,对生物组织影响较大。所以后边实验选择 FBG 带宽为 0.04 nm,此时不仅带宽窄,而且激光器脉冲宽度为几十皮秒,为后期放大实验提供方便。

3 实验及结果分析

根据图 1 搭建全光纤皮秒脉冲种子源实验系统,该系统锁模机制是利用 SESAM 对脉冲功率饱和吸收调制,与偏振无关,所以当系统进入锁模状态后,敲击和扭曲腔内光纤时,系统脉冲光输出保持稳定。该特点使此类锁模光纤激光器相较于非线性偏振旋转激光器在长腔锁模光纤激光器中更具有优势。由于实验室具有的自相关仪测量脉冲宽度最大为 20 ps,本实验中采用高速光电探测器和高速采样示波器测量脉冲宽度,并通过 $\Delta T^2 = \Delta t^2 + \Delta t_d^2 + \Delta t_s^2$ 计算种子源光脉冲宽度^[13],其中 ΔT 为高速采样示波器测量的脉冲宽度; Δt 为种子源输出的脉冲宽度; Δt_d 为探测器响应时间; Δt_s 为示波器响应时间。高速光电探测器上升时间为 25 ps,高速采样示波器 HP83480A 采样带宽为 20 GHz。脉冲宽度为 3 ps 的输入脉冲(自相关仪测量)在高速采样示波器上显示为 50 ps,则 $\Delta t_d^2 + \Delta t_s^2 = 2491 \text{ ps}^2$ 。实验系统中的标记为 SMF_1 的光纤和增益光纤长度分别为 3.35 m 和 0.75 m。

3.1 腔长改变对种子源的输出脉冲特性影响

通过改变标记为 SMF₂ 的光纤长度 l_{SMF_2} 可以改变腔长, 实验中 l_{SMF_2} 长度分别取为 5、10、20、30、50、100 m。设定抽运功率为 140 mW 时, 对输出光脉冲进行的测试表明, 光纤长度为 5、10、20 m 时种子源输出稳定的脉冲系列, 当光纤长度为 30、50、100 m 时, 种子源仍可以输出脉冲光, 但脉冲输出的时序不固定, 呈随机分布。这是由于 l_{SMF_2} 超过 30 m 时, 腔长导致的非线性相移累积超过了 π , 产生脉冲分裂使得腔内存在多个脉冲。 l_{SMF_2} 为 20 m 时, 缓慢增加抽运功率, 当抽运功率增加到 120 mW, 种子源稳定锁模, 此时脉冲重复频率为 4.3 MHz, 输出平均功率为 3.01 mW, 单脉冲能量为 0.7 nJ。图 8(a) 为其稳定锁模时域测试结果, 图 8(b) 为放大显示的单个脉冲时域波形, 其脉冲后沿偏离了高斯谱线, 出现一个较长的拖尾, 这是由光电探测器较长的恢复时间导致。示波器测得的脉冲宽度为 100 ps, 对应输出光脉冲为 86 ps。图 9 为测得的光谱, 其线宽为 0.04 nm, 时间带宽积为 0.9, 信噪比为 50 dB。当将此脉冲放大用于 CARS 光谱探测, 理论光谱分辨率可达 0.3 cm^{-1} 。

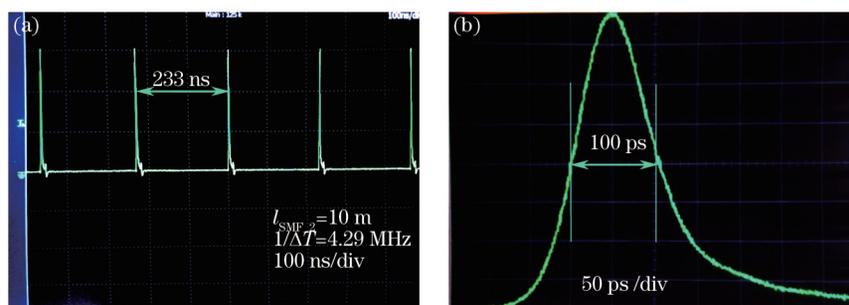


图 8 输出光脉冲。(a) 脉冲系列; (b) 单个脉冲放大

Fig.8 Output optical pulse. (a) Pulse train; (b) enlarged view of a single pulse

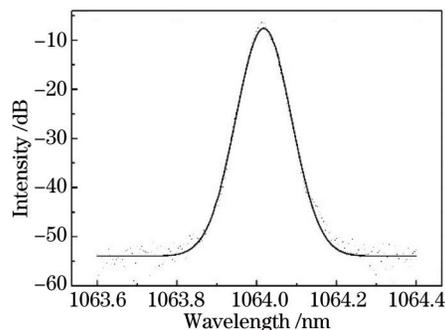


图 9 稳定输出脉冲光谱图

Fig.9 Spectrum of stable output pulse

继续增加抽运功率, 可依次观察到稳定的双脉冲和三脉冲输出, 如图 10 和图 11 所示。当抽运功率增大到 180 mW 时, 脉冲输出时序则呈随机分布。这主要是因为抽运功率增大后, 脉冲峰值能量增大导致了非线性相移累积超过 π 。



图 10 稳定的双脉冲输出

Fig.10 Stable two pulses output



图 11 稳定的三脉冲输出

Fig.11 Stable three pulses output

3.2 抽运功率对种子源的输出脉冲的影响

为了研究抽运功率对种子源输出脉冲的影响,选择 $l_{\text{SMF}_2} = 10 \text{ m}$ 并固定,如果 l_{SMF_2} 过长,种子源从稳定锁模到出现多脉冲现象时抽运功率调节范围较小。图 12 为种子源输出脉冲的平均功率随抽运功率变化曲线。可以看到,脉冲平均功率先随抽运功率增加而增加,当抽运功率小于 136 mW 时,未达到增益饱和,输出平均功率随抽运功率呈线性增加,当抽运功率为 125 mW 时,激光器的斜率效率最大,达到 7.4%,当抽运功率大于 150 mW 后,输出平均功率趋于饱和,最高输出平均功率为 4.04 mW。

随着抽运功率增加,输出脉冲宽度不断减小,当抽运功率大于 150 mW,光脉冲宽度基本保持不变,为 98.02 ps。这是由 SESAM 自身饱和特性决定,SESAM 饱和后的反射率与脉冲通量呈正比例关系,单脉冲能量越高,脉冲中心功率越高,SESAM 反射作用越强,使得脉冲中心强度继续升高而脉冲宽度变窄。继续增加抽运功率,腔内的单脉冲能量将达到 SESAM 过饱和状态,反馈趋于一个饱和定值,因而脉冲宽度保持稳定。

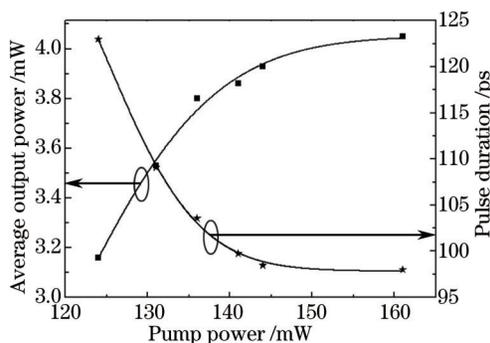


图 12 不同抽运功率下锁模脉冲平均输出功率和脉冲宽度

Fig.12 Pulse average output power and pulse duration under different pump powers

4 结 论

针对 CARS 应用进行了基于线形腔结构的全光纤皮秒脉冲种子源研究。建立了种子源数学模型用于分析脉冲在光纤谐振腔内演化过程,数值研究了腔长和 FBG 带宽对脉冲输出稳定性和脉冲宽度的影响,理论分析表明窄线宽 FBG 有助于抑制非线性相移。搭建实验系统进行了腔长和抽运功率对输出脉冲的影响研究。实验中成功产生 86 ps 的光脉冲,光谱宽度为 0.04 nm,重复频率为 4.3 MHz。该全光纤皮秒脉冲种子源具有窄线宽、结构简单、自启动、无色散管理器件和无保偏器件的优点,为便携型 CARS 激发源的进一步研究打下基础。

参 考 文 献

- 1 C L Evans, E O Potma, M Puoris'haag, *et al.*. Chemical imaging of tissue *in vivo* with video-rate coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005,102(46): 16807-16812.
- 2 C L Evans, X S Xie. Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy: Chemical imaging for biology and medicine[J]. Annu Rev Anal Chem, 2008, 1: 883-909.
- 3 C Krafft, B Dietzek, J Popp. Raman and CARS microspectroscopy of cells and tissues[J]. Analyst, 2009, 134(6): 1046-1057.
- 4 B G Saar, C W Freudiger, J Reichman, *et al.*. Video-rate molecular imaging *in vivo* with stimulated Raman scattering[J]. Science, 2010, 330(6009): 1368-1370.
- 5 Yin Jun, Lin Ziyang, Qu Junle, *et al.*. Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopic imaging technique[J]. Chinese J 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.
- 6 M Baumgartl, M Chemnitz, C Jauregui, *et al.*. All-fiber laser source for CARS microscopy based on fiber optical parametric frequency conversion[J]. Opt Express, 2012, 20(4): 4484-4493.
- 7 J Su, R Xie, C K Johnson, *et al.*. Single-fiber-laser-based wavelength tunable excitation for coherent Raman spectroscopy[J]. J Opt Soc Am B, 2013, 30(6): 1671-1682.
- 8 A F Pegoraro, A Ridsdale, D J Moffatt, *et al.*. All-fiber CARS microscopy of live cells[J]. Opt Express, 2009, 17(23): 20700-20706.
- 9 M Marangoni, A Gambetta, C Manzoni, *et al.*. Fiber-format CARS spectroscopy by spectral compression of femtosecond pulses from

- a single laser oscillator[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3262–3264.
- 10 M Chemnitz, M Baumgartl, T Meyer, *et al.*. Widely tuneable fiber optical parametric amplifier for coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[J]. *Opt Express*, 2012, 20(24): 26583–26595.
- 11 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.
- 12 A Agnesi, L Carrá, F Pirzio, *et al.*. Low repetition rate, hybrid fiber/solid-state, 1064 nm picosecond master oscillator power amplifier laser system[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, 30(11): 2960–2965.
- 13 Y Taira, N Yamamoto, M Hosaka, *et al.*. Development of pulse width measurement techniques in a picosecond range of ultra-short Gamma ray pulses[C]. Sam Sebastian: Proceedings of IPAC, 2011. 1473–1475.

栏目编辑：王晓琰