

# 用于相干反斯托克斯拉曼散射激发源的快速 宽范围斯托克斯光波长调谐

江俊峰<sup>1</sup>, 吴 航<sup>1</sup>, 刘 琨<sup>1</sup>, 王 双<sup>1</sup>, 黄 灿<sup>1</sup>, 张学智<sup>1</sup>, 于 哲<sup>1</sup>,  
陈文杰<sup>1</sup>, 马 喆<sup>1</sup>, 惠荣庆<sup>2</sup>, 贾文娟<sup>3</sup>, 刘铁根<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 光纤传感研究所, 天津 300072;

<sup>2</sup>堪萨斯大学电气工程与计算科学系, 堪萨斯州 劳伦斯 66045, 美国;

<sup>3</sup>国家海洋技术中心, 天津 300112

**摘要** 提出了基于液晶相位延迟的用于相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)激发源的斯托克斯光的快速宽范围波长电调谐方法。数值仿真分析了脉冲的峰值功率和光子晶体光纤(PCF)长度对光孤子自频移(SSFS)频移量的影响, 计算结果表明对 2 m 长的 PCF, 注入光脉冲的峰值功率为 2.7 kW 时, 可探测波数为 3509 cm<sup>-1</sup>。基于液晶相位延迟器构建了快速波长调谐装置并搭建了实验系统, 实验结果表明波长切换响应时间可达 0.165 ms, 对 1.98 m 长的 PCF 注入峰值功率范围为 0.108~2.517 kW 的光脉冲时, 基阶孤子中心波长调谐范围为 807~1064 nm, 理论可探测波数范围为 432~3422 cm<sup>-1</sup>。

**关键词** 激光器; 光孤子自频移; 波长调谐; 相干反斯托克斯拉曼散射; 光子晶体光纤

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0101002

## Wavelength Tuning of Stokes Optical Pulse with High Speed and Wide Range for Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Excitation Source

Jiang Junfeng<sup>1</sup>, Wu Hang<sup>1</sup>, Liu Kun<sup>1</sup>, Wang Shuang<sup>1</sup>, Huang Can<sup>1</sup>, Zhang Xuezhil<sup>1</sup>,  
Yu Zhe<sup>1</sup>, Chen Wenjie<sup>1</sup>, Ma Zhe<sup>1</sup>, Hui Rongqing<sup>2</sup>, Jia Wenjuan<sup>3</sup>, Liu Tiegeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of the Ministry of Education, School of Precision

Instrument & Opto-Electronics Engineering, Institute of Optical Fiber Sensing, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering & Computer Science, The University of Kansas, Lawrence, Kansas 66045, USA;

<sup>3</sup>National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

**Abstract** An approach for wavelength tuning of Stokes optical pulse with high speed and wide range for coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) excitation source is presented based on the liquid crystal phase retardance. Influences of the photonic crystal fiber (PCF) length and optical pulse peak power on the frequency shift resulting from the soliton self-frequency shift (SSFS) are analyzed through the numerical simulation. Result shows that when an optical pulse with peak power 2.7 kW is launched into a 2 m PCF, the detectable wavenumber is 3509 cm<sup>-1</sup>. A fast wavelength tuning module is constructed with a liquid crystal variable retarder, and then the experiment setup is established. Experimental results show that the response time of wavelength switching can reach 0.165 ms. Tuning range of the central wavelength of the first order soliton is from 807 nm to 1064 nm when the optical pulse peak power with a range from 0.108 kW to 2.517 kW is launched into a 1.98 m PCF, and the theoretical detectable

收稿日期: 2016-07-13; 收到修改稿日期: 2016-10-07

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、国家自然科学基金(61378043, 61227011, 61475114, 61505139, 11004150)、国家 863 计划(2014AA093403)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200)、深圳市科技创新委员会项目(JCYJ20120831153904083)

作者简介: 江俊峰(1977—), 男, 博士, 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

wavenumber will range from  $432\text{ cm}^{-1}$  to  $3422\text{ cm}^{-1}$ .

**Key words** lasers; soliton self-frequency shifts; wavelength tuning; coherent anti-Stokes Raman scattering; photonic crystal fiber

**OCIS codes** 140.3518; 190.6135; 300.6230; 060.5295

## 1 引 言

相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)显微成像技术是一种通过探测分子振动能级来识别特定分子的非荧光标记成像技术,避免了外来标记物对探测样品造成影响,同时具有较高的探测灵敏度,因此在活细胞、蛋白质结构和脂质膜等生物成像领域有很好的应用前景<sup>[1-6]</sup>。

CARS 信号的产生是一个三阶非线性光学过程,当两束同步光脉冲的频率差与待测样品的分子振动频率相匹配时将产生共振,从而以反斯托克斯光的形式输出信号。典型的 CARS 激发源是由钛宝石固体激光器或是倍频钕激光器结合光学参量振荡器构成,体积庞大、价格昂贵、需要专人维护和调试<sup>[7]</sup>。为了获得结构紧凑、易用的 CARS 激发源,研究人员基于光纤技术提出多种方案,主要包括基于光纤超连续谱<sup>[8]</sup>、基于光纤四波混频源<sup>[9-11]</sup>和基于光孤子自频移(SSFS)<sup>[12]</sup>三类。基于光纤超连续谱的 CARS 激发源方案通过产生宽谱光并采用分光阵列探测的方式来实现不同波长下的 CARS 信号探测,因此信号强度较低。基于光纤四波混频的 CARS 激发源方案通过调谐种子源的方式实现斯托克斯光脉冲波长扫描,如 Goh 等<sup>[13]</sup>将光纤光栅粘贴于弹性梁,通过对光纤光栅施加机械应力改变波长,但机械方法用于直接波长调谐速度较慢,尚需进一步发展。基于 SSFS 的 CARS 源方案可以通过控制注入光功率实现斯托克斯光脉冲的波长连续调谐,如 Groß 等<sup>[14]</sup>采用机械旋转半波片使光偏振方向改变,然后通过检偏器实现了对光子晶体光纤(PCF)中注入光功率的控制,但使用机械运动部件使得调节速度较慢,稳定性也较差;Adany 等<sup>[15]</sup>利用铌镁酸铅(PMN-PT)晶体构建延迟器件实现光偏振方向电控旋转,斯托克斯光脉冲波长调谐速度达到微秒量级,但是半波电压高达 275 V,且晶体制作要求较高。Saint-Jalm 等<sup>[16]</sup>则通过 PCF 产生固定频移的孤子作为斯托克斯光脉冲,在对抽运光脉冲和斯托克斯光脉冲线性啁啾后,通过电控延迟线控制两脉冲之间的延迟来实现频差调谐,调谐时间  $50\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}^{-1}$ ,但调谐范围受啁啾限制,只有  $400\text{ cm}^{-1}$ 。

本文针对 CARS 激发源的斯托克斯光快速宽范围波长调谐技术展开研究,提出了基于液晶相位延迟的 CARS 激发源的斯托克斯光快速宽范围波长调谐,对峰值功率调谐特性进行分析与研究。数值研究了脉冲的峰值功率和光纤长度对 SSFS 频移量的影响,采用向列型液晶构建的 PCF 注入光功率快速电调节装置,斯托克斯光脉冲的调谐电压小于 25 V,调谐响应时间 0.165 ms;选取 PCF 长度为 1.98 m,基阶孤子中心波长调谐范围为 807~1064 nm,理论可探测波数范围为  $432\sim 3422\text{ cm}^{-1}$ 。该方法能以较低的电压(25 V)和较快的速度实现无运动部件的电调谐。

## 2 斯托克斯光的快速波长电调谐仿真分析

基于飞秒激光输入下的 PCF 基阶孤子自频移效应实现斯托克斯光脉冲的波长调谐。调谐原理如图 1 所示。

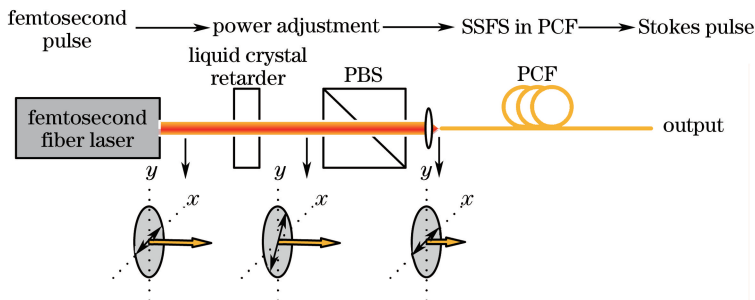


图 1 斯托克斯光的波长调谐原理图

Fig. 1 Principle diagram of the wavelength tuning of Stokes optical pulse

因为飞秒激光源输出的是水平线偏振光,所以利用相位延迟器和偏振分束器(PBS)实现 PCF 注入功率调节。相位延迟器的慢轴与水平方向夹角为  $45^\circ$ ,当飞秒脉冲通过相位延迟器时,其偏振态旋转,从而使透过 PBS 的光功率改变。相位延迟器采用液晶材料,在外电场作用下液晶分子会根据所加电场改变倾斜度,从而改变双折射率。相比晶体材料,其半波电压要低很多。采用液晶产生最大相位延迟量所需电压小于 25 V,同时液晶厚度对超短脉冲的脉冲宽度影响可以忽略。在外加电压作用下向列液晶的上升时间满足  $\tau_{\text{rise}} = \{1/[(V^2/V_{\text{th}}^2) - 1]\} \cdot \tau_0$ ,下降时间  $\tau_{\text{fall}} = \{1/[(V_{\text{b}}^2/V_{\text{th}}^2) - 1]\} \cdot \tau_0$ ,其中  $V_{\text{b}}$  为偏置电压, $V$  为施加电压, $V_{\text{th}}$  是阈值电压, $\tau_0$  为恢复时间,满足  $\tau_0 = rd^2/(K\pi^2)$ , $r$  为旋转粘滞系数, $d$  为液晶层厚度, $K$  为倾斜弹性常数<sup>[17]</sup>。可以看出通过增大外加电压能够显著缩短上升时间,但恢复时间则由液晶旋转粘滞系数和液晶层厚度决定,通过减小液晶层厚度可以缩短恢复时间。所用液晶的厂家提供的参数为阈值电压  $V_{\text{th}} = 0.45$  V,从 1.6 V 阶跃到 10 V 的上升时间为 0.356 ms,可计算得到恢复时间  $\tau_0$  为 189.971 ms。当偏置电压  $V_{\text{b}} = 1.8$  V,施加电压  $V = 20$  V,则上升时间计算值为 0.096 ms,下降时间计算值为 12.665 ms。可以看出上升时间远小于下降时间,因此当利用上升电压驱动液晶时,可实现 CARS 激发源的斯托克斯波长快速调谐。

忽略四阶以上的高阶色散参量,假定输入飞秒脉冲为高斯脉冲,飞秒脉冲在 PCF 中传播遵循广义非线性薛定谔方程<sup>[18]</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = -\frac{\alpha}{2}A - \sum_{m=1}^4 \beta_m \frac{i^{m-1}}{m!} \frac{\partial^m A}{\partial t^m} + i\gamma \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t}\right) \times \left[A(Z,t) \int_{-\infty}^{+\infty} R(t') |A(Z,t-t')|^2 dt'\right], \quad (1)$$

$$R(t) = (1 - f_{\text{R}}) \delta(t) + f_{\text{R}} h_{\text{R}}(t), \quad (2)$$

式中  $A$  为对位置慢变的脉冲包络, $A = \sqrt{P_0} \exp(-t^2/2T_0^2)$ , $P_0$  为注入光脉冲的峰值功率, $T_0$  为注入光脉冲的脉冲宽度, $Z$  为位置坐标, $\alpha$  为线性损耗, $\beta_1$  为群速度色散参量, $\beta_m$  ( $m \geq 2$ ) 为高阶色散系数, $\gamma$  为光纤的非线性系数, $\omega_0$  为入射脉冲的中心频率, $R(t)$  为非线性响应函数, $f_{\text{R}}$  表示延迟拉曼响应对非线性极化的比例系数, $h_{\text{R}}(t) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1 \tau_2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \sin\left(\frac{t}{\tau_1}\right)$ ,对由二氧化硅材料控制的光纤, $\tau_1 = 12.2$  fs, $\tau_2 = 32.0$  fs, $f_{\text{R}} = 0.18$ 。

忽略光纤损耗和三阶及以上高阶色散参量的影响,可以得到基阶孤子频移量  $\Omega_{\text{p}}$  与注入光峰值功率  $P_0$  和光纤长度  $L$  的简化定性关系<sup>[18]</sup>

$$\Omega_{\text{p}}(P_0, L) = -\frac{8T_{\text{R}}\gamma P_0}{15T_0^2} L, \quad (3)$$

式中  $T_{\text{R}}$  为非线性响应函数  $R(t)$  的一阶矩, $T_{\text{R}} = \int_0^{\infty} tR(t)dt \approx f_{\text{R}} \int_0^{\infty} th_{\text{R}}(t)dt$ ,可知基阶孤子从 PCF 出射时的波长主要受  $P_0$  和 PCF 长度  $L$  影响。因此可通过对  $P_0$  和  $L$  的控制,使基阶光孤子按预期变化。为了准确分析  $P_0$  和  $L$  的影响,基于(1)式采用分步傅里叶算法进行数值计算,计算中将光纤分成若干小段,且每一小段光纤认为色散和非线性单独作用并分别计算。计算时,PCF 参数采用目前 NKT 公司商用成熟的 NL-PM-750 光子晶体光纤参数。所用的飞秒激光参数为中心波长  $\lambda_0 = 780$  nm 和脉冲宽度  $T_0 = 120$  fs,位于 NL-PM-750 的反常色散区,可以产生光孤子。包含脉冲在内的时域窗宽度取为 3000 fs,采样点数为  $2^{12}$ ,计算步长为  $h = (2/3) \times 10^{-3}$  m,通过不同迭代次数对应不同光纤长度的输出结果。迭代次数  $N = 3000$  时,对应计算光纤长度  $L = N \times h = 2$  m。数值仿真参数如表 1 所示。

表 1 数值仿真的参数设置

Table 1 Parameters of the numerical simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda_0/\text{nm}$	780	$T_0/\text{fs}$	120
$\alpha/(\text{dB/km})$	0	$\gamma/(\text{W} \cdot \text{nm})^{-1}$	$9.7 \times 10^{-11}$
$\beta_2/(\text{fs}^2/\text{nm})$	$-2.35 \times 10^{-5}$	$\beta_3/(\text{fs}^3/\text{nm})$	$2.12 \times 10^{-4}$
$\beta_4/(\text{fs}^4/\text{nm})$	$-3.23 \times 10^{-6}$	$L/\text{m}$	2
Time window /fs	3000	Sampling number	$2^{12}$

图 2(a)所示是在  $P_0$  为 2.7 kW 的条件下,  $L$  为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 m 时的输出光谱计算结果。可以看到在  $L$  为 0.2 m 处, 出现明显的基阶孤子自频移现象;  $L$  为 0.4 m 时开始出现二阶孤子, 随光纤长度的增加, 基阶孤子和二阶孤子均向长波方向移动且基阶孤子光谱半峰全宽(FWHM)基本保持不变, 约为 25.5 nm。图 2(b)给出了基阶孤子中心波长和相对入射光中心波长的频移量以及二阶孤子中心波长随光纤长度的变化。可以看到基阶孤子频移量随光纤长度逐渐变大, 在光纤长度 0.2 m 处, 基阶孤子中心波长为 863 nm, 频移量为  $1233 \text{ cm}^{-1}$ , 在光纤长度为 2 m 处, 基阶孤子中心波长可达到 1074 nm, 其频移量为  $3509 \text{ cm}^{-1}$ , 基本覆盖典型分子振动能级。二阶孤子中心波长最大为 907.8 nm, 频移速度比基阶孤子慢。计算结果显示, PCF 长度  $L$  超过 1.8 m 时, 产生的斯托克斯光脉冲的可探测波数范围可以覆盖常见生物分子振动谱范围。

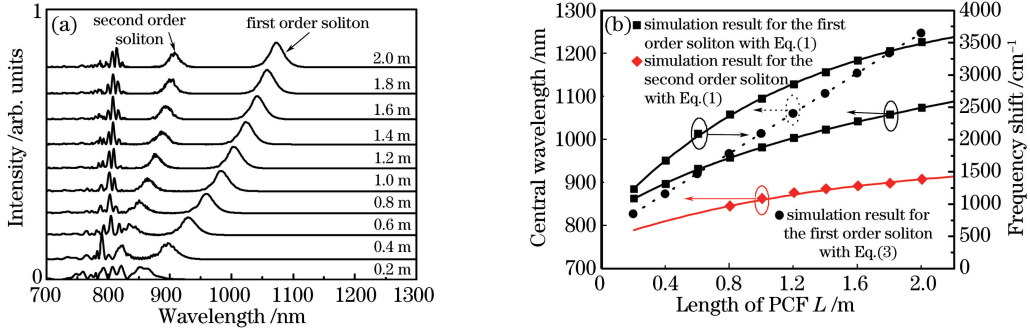


图 2 (a)不同  $L$  下的孤子光谱计算结果; (b)基阶孤子中心波长和频移量随 PCF 长度  $L$  变化曲线以及二阶孤子中心波长随 PCF 长度  $L$  变化曲线

Fig. 2 (a) Numerical results of the soliton spectrum under different  $L$ ; (b) central wavelength and frequency shift of the first order soliton versus length of PCF  $L$ , and central wavelength of the second order soliton versus length of PCF  $L$

为研究不同峰值功率下的孤子光谱变化规律, 固定 PCF 长度  $L$  为 2 m, 计算不同  $P_0$  下的输出结果。图 3(a)所示为 PCF 长度为 2 m,  $P_0$  为 0.10, 0.25, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50, 1.80, 2.10, 2.40, 2.70 kW 条件下的输出光谱计算结果。可以看到光孤子随  $P_0$  的增加向长波方向移动且孤子光谱的半峰全宽逐渐增大, 二阶孤子从峰值功率 1.20 kW 开始较为明显。图 3(b)给出了基阶孤子中心波长和相对入射光中心波长的频移量以及二阶孤子中心波长随  $P_0$  的变化, 可以看到基阶孤子随  $P_0$  的增加逐渐向长波方向移动, 平均波长调谐系数为  $110.95 \text{ nm/kW}$ , 对应的平均频移系数为  $1315.91 \text{ cm}^{-1}/\text{kW}$ 。二阶孤子的平均波长调谐系数为  $64.09 \text{ nm/kW}$ 。基于(3)式的计算结果虽然能定性表示基阶孤子随  $L$  和  $P_0$  的变化, 但随  $L$  和  $P_0$  增大, 非线性效应加强, 误差也随之变大。

图 4(a)、(b)是基阶孤子的光谱宽度和脉冲宽度在不同  $P_0$  下的变化曲线。可以看到光谱宽度随  $P_0$  的增加逐渐变宽, 由 0.1 kW 时的 6.45 nm 增大到 2.7 kW 时的 25.45 nm。脉冲宽度近似线性变化, 由 0.1 kW 时的 273.8 fs 增大到 2.7 kW 时的 296.0 fs。

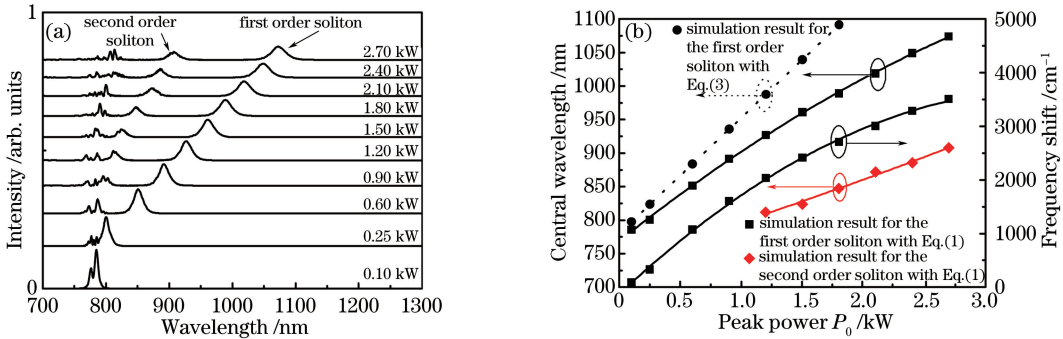


图 3 (a)不同  $P_0$  下的孤子光谱计算结果; (b)基阶孤子中心波长和频移量随  $P_0$  变化曲线以及二阶孤子中心波长随  $P_0$  变化曲线

Fig. 3 (a) Numerical results of the soliton spectrum under different  $P_0$ ; (b) central wavelength and frequency shift of the first order soliton versus  $P_0$ , and central wavelength of the second order soliton versus  $P_0$



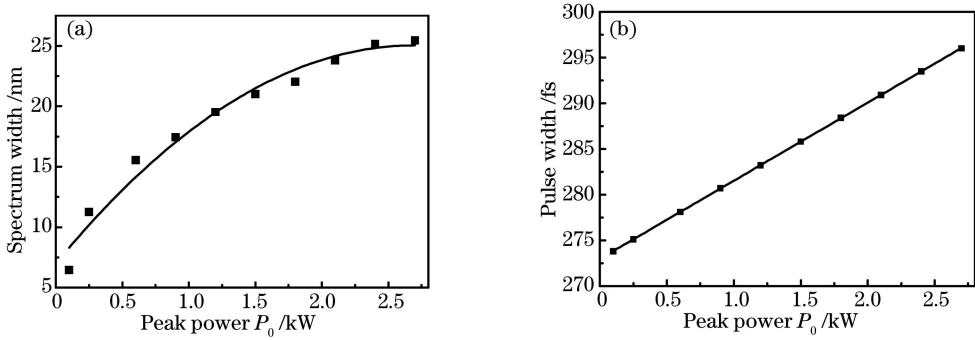


图4 (a)光谱宽度和(b)脉冲宽度随  $P_0$  的变化曲线

Fig. 4 Simulation results of (a) spectrum width and (b) pulse width versus  $P_0$ .

### 3 斯托克斯光的快速波长电调谐实验结果及分析

如图5搭建实验系统,其中电控衰减器中的液晶延迟器和PBS是空间光传输,通过两个光纤耦合器耦合进光纤。基于上文中的仿真结果,选取PCF长度为1.98 m,通过透镜耦合进入PCF的峰值功率最大超过2.5 kW,控制液晶相位延迟器电压调节光偏振态,再经PBS实现注入PCF的光脉冲功率控制,该光脉冲用作斯托克斯光脉冲,采用光谱仪测量斯托克斯光脉冲光谱,利用光功率计监测PBS的垂直偏振方向上的光功率。图中SMF代表单模光纤。

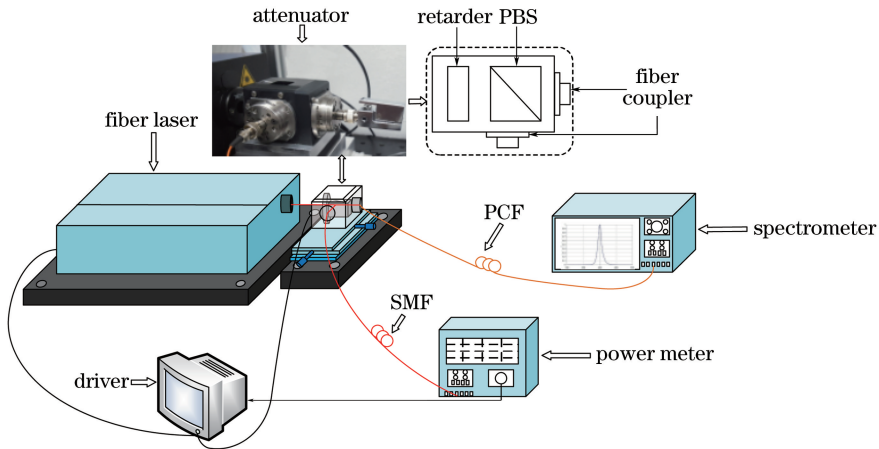


图5 实验系统图

Fig. 5 Experiment system setup

#### 3.1 斯托克斯光波长调谐电控特性的测试

图6是测试获得的平均光功率的控制电压调节曲线。平均光功率在控制电压为0.8 V和1.8 V时衰减最小,在1.2 V时衰减最大,其中1.2 V比1.8 V的光衰减值大22.74 dB,在1.8 V以后光衰减值逐步单调增大,25 V时光衰减值为20.87 dB。选择控制电压在1.8~25 V范围内,这样能实现对功率的单调调控,且可以以较低精度的控制电压获得较高的功率调控精度。

孤子频移的非线性响应时间非常快,因此调谐响应时间主要取决于电控衰减调节装置的响应。采用重复频率为2 Hz的方波控制电压测试该响应时间,方波控制电压的低电压为1.8 V,高电压为20 V,光电探测器的响应时间为43 ns。因此响应时间主要受液晶延迟器响应速度的影响。实验结果如图7所示,测得上升时间为0.165 ms,下降时间为61 ms,较理论计算值偏大,但仍在同一量级。1.8 V和20 V分别对应基阶孤子的波长为1064 nm和850 nm,因此对应频差 $2367\text{ cm}^{-1}$ 的切换时间为0.165 ms。

#### 3.2 斯托克斯光波长调谐范围研究

图8(a)所示是实验测得的  $P_0$  为0.108,0.264,0.443,1.012,1.411,2.007,2.517 kW时的输出光谱。在峰值功率0.108 kW处,输出光谱出现基阶孤子;随  $P_0$  增大,基阶孤子向长波方向移动,且光谱宽度也随之

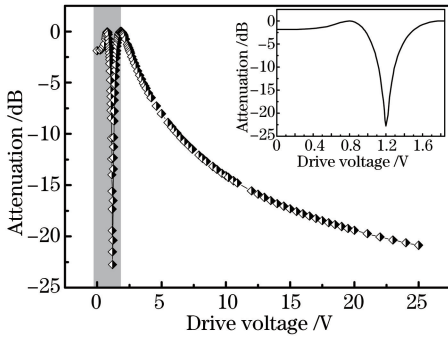


图 6 光功率衰减-电压特性

Fig. 6 Relationship between the optical attenuation and drive voltage

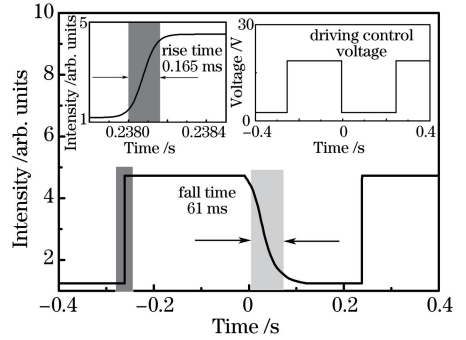


图 7 波长调谐响应时间

Fig. 7 Response time of the wavelength tuning

增大,当  $P_0$  为 1.012 kW 时,二阶孤子出现; $P_0$  为 2.517 kW 时,基阶孤子中心波长为 1064 nm,光谱宽度为 22.07 nm,二阶孤子中心波长为 921 nm,光谱宽度为 15.22 nm,与仿真结果基本相同。基阶孤子的光谱宽度在孤子自频移的过程中逐渐变大;基阶孤子和二阶孤子同时向长波方向移动,且基阶孤子和二阶孤子的频差基本保持不变。

图 8(b)为基阶孤子和二阶孤子的中心波长随  $P_0$  的变化,以及基阶孤子频移量随  $P_0$  的变化,实线为拟合曲线,孤子的频移量随  $P_0$  的增大逐渐变大,基阶孤子平均波长调谐系数为 106.68 nm/kW,对应的平均频移系数为 1238.64  $\text{cm}^{-1}/\text{kW}$ 。当基阶孤子用作斯托克斯光时,0.108 kW(对应基阶孤子中心波长为 807 nm)所能探测的最小波数为 432  $\text{cm}^{-1}$ ,2.517 kW(对应基阶孤子中心波长为 1064 nm)能探测的最大波数为 3422  $\text{cm}^{-1}$ ,从而可以覆盖常见生物分子的分子振动谱范围(520~3059  $\text{cm}^{-1}$ )<sup>[19]</sup>。且当斯托克斯光脉冲波长位于 807 nm 时,斯托克斯光峰值功率最小,但仍大于 0.1 kW,而抽运光最小值也在 0.1 kW 以上,可以满足生物上 CARS 显微探测的功率要求<sup>[20]</sup>。图中点线是仿真模拟的结果,实验与理论值存在一定误差,但曲线变化趋势基本相同。

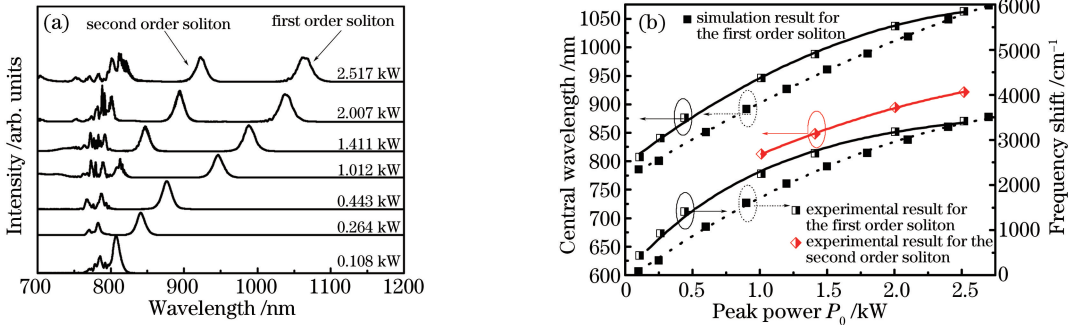


图 8 (a) PCF 在不同  $P_0$  下的输出光谱图;(b)基阶孤子中心波长和频移量随入射光脉冲峰值功率的变化以及二阶孤子中心波长随  $P_0$  的变化

Fig. 8 (a) Output spectra of PCF under different  $P_0$ ; (b) central wavelength and frequency shift of the first order soliton versus  $P_0$ , and central wavelength of the second order soliton versus  $P_0$

图 9 是基阶孤子和二阶孤子光谱宽度随  $P_0$  的变化,基阶孤子从 0.108 kW 下的 10.99 nm (168.82  $\text{cm}^{-1}$ )到 2.517 kW 下的 22.08 nm(135.49  $\text{cm}^{-1}$ ),光谱逐渐展宽,与仿真结果相符。二阶孤子的光谱宽度较小,从 1.012 kW 下的 9.24 nm 到 2.517 kW 下的 15.32 nm。图中点线是对应的理论模拟结果,与实验有一定误差,光谱宽度的最大误差为 3.2 nm,飞秒脉冲的窄脉宽带来的频域上的宽谱宽导致 CARS 信号的光谱分辨率在 100  $\text{cm}^{-1}$  量级。

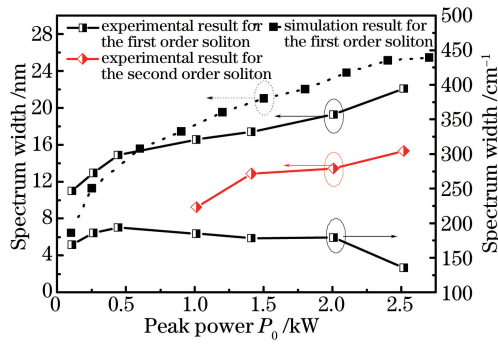


图 9 基阶和二阶光孤子谱宽随  $P_0$  变化曲线

Fig. 9 Spectrum width of the first order soliton and the second order soliton versus  $P_0$ .

## 4 结 论

针对 CARS 应用对斯托克斯光的快速宽范围波长调谐进行研究,基于飞秒脉冲在 PCF 中波长转换的数学模型,分析了 PCF 长度和注入光脉冲的峰值功率对光孤子自频移过程的影响,结果显示 2 m 长的 PCF 在注入光功率 2.7 kW 下,用作斯托克斯光的基阶孤子与抽运光达到  $3509 \text{ cm}^{-1}$  的理论频差。搭建实验系统研究注入光脉冲峰值功率对孤子中心波长和光谱宽度的影响,实验测得  $2367 \text{ cm}^{-1}$  频差的调谐响应时间为 0.165 ms,调谐获得斯托克斯光与抽运光波数差为  $432 \sim 3422 \text{ cm}^{-1}$ ,可以覆盖常见生物分子的分子振动谱,为研究全光纤 CARS 激发源打下基础。

## 参 考 文 献

- [1] Goodhead R M, Moger J, Galloway T S, *et al.* Tracing engineered nanomaterials in biological tissues using coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) microscopy - a critical review[J]. *Nanotoxicology*, 2015, 9(7): 928-939.
- [2] Schie I W, Krafft C, Popp J. Applications of coherent Raman scattering microscopies to clinical and biological studies [J]. *Analyst*, 2015, 140(12): 3897-3909.
- [3] Evans C L, Potma E O, Puoris'haag M, *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.
- [4] 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: 883-909.
- [5] Krafft C, Dietzek B, Popp J. Raman and CARS microspectroscopy of cells and tissues[J]. *Analyst*, 2009, 134(6): 1046-1057.
- [6] Saar B G, Freudiger C W, Stanley C M, *et al.* Video-rate molecular imaging *in vivo* with stimulated Raman scattering [J]. *Science*, 2010, 330(6009): 1368-1370.
- [7] Su J, Xie R X, Johnson C K, *et al.* Single-fiber-laser-based wavelength tunable excitation for coherent Raman spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(6): 1671-1682.
- [8] Kano H, Hamaguchi H. Vibrationally resonant imaging of a single living cell by supercontinuum-based multiplex coherent anti-Stokes Raman scattering microspectroscopy[J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1322-1327.
- [9] Baumgartl M, Chemnitz M, Jauregui C, *et al.* All-fiber laser source for CARS microscopy based on fiber optical parametric frequency conversion[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4484-4493.
- [10] Jiang Junfeng, Guo Honglong, Liu Tiegeng, *et al.* All-fiber narrow bandwidth picosecond pulse seed source for CARS excitation source[J]. *Chineses J Lasers*, 2015, 42(2): 0205004.  
江俊峰, 郭洪龙, 刘铁根, 等. 用于 CARS 激发源的全光纤窄线宽皮秒脉冲种子源的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0205004.
- [11] Baumgartl M, Gottschall T, Abreu-Afonso J, *et al.* Alignment-free, all-spliced fiber laser source for CARS microscopy based on four-wave-mixing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21010-21018.
- [12] 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.

- 
- [13] Goh C S, Mokhtar M R, Butler S A, *et al.* Wavelength tuning of fiber Bragg gratings over 90 nm using a simple tuning package[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(4): 557-559.
- [14] Groß P, Kleinschmidt L, Beer S, *et al.* Single-laser light source for CARS microscopy based on soliton self-frequency shift in a microstructured fiber[J]. Applied Physics B, 2010, 101(1): 167-172.
- [15] Adany P, Price E S, Johnson C K, *et al.* Switching of 800 nm femtosecond laser pulses using a compact PMN-PT modulator[J]. The Review of Scientific Instruments, 2009, 80(3): 033107.
- [16] Saint-Jalm S, Berto P, Jullien L, *et al.* Rapidly tunable and compact coherent Raman scattering light source for molecular spectroscopy[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2014, 45(7): 515-520.
- [17] Wu S T. Design of a liquid crystal based tunable electrooptic filter[J]. Applied Optics, 1989, 28(1): 48-52.
- [18] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. 3<sup>rd</sup> edition. San Diego: Academic Press, 2009: 37-38.
- [19] Félix-Rivera H, Hernández-Rivera S P. Raman spectroscopy techniques for the detection of biological samples in suspensions and as aerosol particles: a review[J]. Sensing and Imaging, 2012, 13(1): 1-25.
- [20] Volkmer A. Coherent Raman scattering microscopy[M]. 3<sup>rd</sup> edition. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 129-130.