

用于 CARS 激发源的全光纤飞秒脉冲谱压缩

江俊峰 黄灿 刘琨 张永宁 王双 张学智 马喆 陈文杰 于哲 刘铁根

All-fiber spectral compression of femtosecond pulse for coherent anti-Stokes Raman scattering excitation source

Jiang Jun-Feng Huang Can Liu Kun Zhang Yong-Ning Wang Shuang Zhang Xue-Zhi Ma Zhe Chen Wen-Jie Yu Zhe Liu Tie-Gen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 204207 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.204207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铥光纤激光器

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber

物理学报.2017, 66(11): 114209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114209>

新型高双折射微结构纤芯光子晶体光纤的可调谐超连续谱的特性研究

Experimental and numerical study of tuneable supercontinuum generation in new kind of highly birefringent photonic crystal fiber

物理学报.2017, 66(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094204>

光纤光热干涉气体检测技术研究进展

Advances in optical fiber photothermal interferometry for gas detection

物理学报.2017, 66(7): 074212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074212>

基于偏振延时干涉技术的光子波形产生技术研究

Photonic microwave waveform generation based on polarization delay interference

物理学报.2016, 65(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224203>

具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay

物理学报.2015, 64(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234206>

用于CARS激发源的全光纤飞秒脉冲谱压缩*

江俊峰[†] 黄灿 刘琨 张永宁 王双 张学智 马喆 陈文杰
于哲 刘铁根

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 光纤传感研究所, 天津市光纤传感工程中心, 天津 300072)

(2017年3月24日收到; 2017年6月8日收到修改稿)

进行了基于光纤预啁啾和自相位调制的多模/单模组合式全光纤啁啾谱压缩研究. 提出利用多模光纤模式估计群速度色散均值的方法, 并将该估计值作为啁啾参量分析的计算参数, 仿真计算了50/125 μm 折射率渐变多模光纤的群速度色散均值及其与单模光纤在不同长度比值下的光谱压缩效果. 采用三种折射率渐变多模光纤进行实验, 对比分析了折射率渐变多模光纤的芯径大小及其与单模光纤的长度比值对光谱压缩效果的影响. 实验结果表明使用50/125 μm 折射率渐变多模光纤获得光谱最大压缩比为5.796, 谱宽为2.243 nm, 与理论仿真一致; 使用105/125 μm 折射率渐变多模光纤, 可进一步提高压缩比至152.941, 输出谱宽为0.085 nm的光脉冲. 将此脉冲用于相干反斯托克斯拉曼散射光谱探测, 理论光谱分辨率可达 1.386 cm^{-1} .

关键词: 非线性光纤光学, 光纤预啁啾, 自相位调制, 光谱压缩**PACS:** 42.81.-i, 42.65.-k, 42.65.Dr**DOI:** 10.7498/aps.66.204207

1 引言

采用飞秒脉冲进行相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)成像是近年来一个研究热点^[1-4], 但飞秒脉冲的宽光谱限制了成像光谱分辨率. 光谱压缩处理可以有效地解决这一问题, 从而在CARS成像中实现高的光谱分辨率^[5].

通过棱镜对或光栅对给输入脉冲提供负啁啾, 可在单模光纤或光子晶体光纤中实现光谱压缩^[6-9]. 棱镜对或光栅对可灵活调节啁啾参量, 因而脉冲光谱压缩量具有灵活可调的优点, 但空间结构也使其存在稳定性较差和体积较大的问题. 采用全光纤结构进行光谱压缩可以更好地满足结构紧凑的要求. 目前研究人员提出的方法主要分为两类, 一类是基于光孤子自频移效应的光谱压缩方法. 如Fedotov等^[10]利用光子晶体光

纤的光孤子自频移效应实现飞秒脉冲的光谱压缩, 压缩比随光孤子波长增加而增大, 脉冲宽度为50 fs、中心波长为1270 nm的光脉冲被注入到40 m长的光子晶体光纤中, 在1580 nm波长处获得压缩比为6.5. Nishizawa等^[11]通过熔接多段单模光纤与色散位移光纤制作了具有梳状色散分布的色散渐增光纤, 将200 fs的光脉冲注入该特制光纤中, 在1620—1850 nm波长范围内, 压缩比达到19.8—25.9, 但该特制光纤需要精细控制多段光纤长度, 制作困难且光功率损耗大. Chuang和Huang^[12]将脉宽为350 fs、中心波长为1500 nm的脉冲输入一段1 km长且具有色散缓慢线性增加特性的光纤中, 实现了压缩比为15.5的光孤子光谱压缩, 随后该课题组将输入脉宽减小到112 fs, 获得压缩比28.6^[13]. 基于光孤子自频移效应的光谱压缩方法不需要对输入脉冲提供预啁啾, 但光孤子自频移带来的输出脉冲波长移动使之无法对单一固

* 国家自然科学基金(批准号: 61378043, 61675152, 61227011, 61475114, 61505139)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2013YQ030915)、天津市自然科学基金(批准号: 13JCYBJC16200)和深圳市科技创新委员会项目(批准号: JCYJ20120831153904083)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

定中心波长的脉冲进行光谱压缩. 另一类方法是基于光纤预啾啾和自相位调制的光谱压缩方法. 如 Toneyan 等^[14]将空心光纤与单模光纤串接实现全光纤光谱压缩, 压缩比为 8.4. 该方法克服了基于光孤子自频移效应的光谱压缩方法的局限性, 但以往研究实现的压缩比仍然较小, 且未见详细的理论分析.

本文研究了基于光纤预啾啾和自相位调制的多模/单模组合式全光纤啾啾谱压缩, 提出了采用多模光纤进行预啾啾的方法, 利用多模光纤芯径大、色散大的特点, 避免了引入啾啾时非线性效应的影响, 从而能够获得较好的啾啾效果. 对 50/125 μm 折射率渐变多模光纤 (GI-MMF) 的色散参数及其与 780HP 单模光纤 (SMF) 长度比值对压缩比的影响进行了数值研究, 获得压缩比 5.230. 使用搭建系统实验对比了 50/125 μm, 62.5/125 μm 以及 105/125 μm 三种不同芯径的 GI-MMF 与 SMF 在不同长度比值下的光谱压缩结果. 实验结果显示使用 50/125 μm GI-MMF 可获得压缩比 5.796, 与理论仿真结果一致; 相比于其他两种芯径的 GI-MMF, 使用 105/125 μm GI-MMF 可获得最大压缩比 152.941, 输出谱宽为 0.085 nm 的光脉冲.

2 脉冲啾啾谱压缩理论分析与仿真

2.1 脉冲啾啾谱压缩理论分析

带有初始啾啾的脉冲在单模光纤正常色散区传播时, 由于自相位调制作用, 光谱宽度会根据初始啾啾的不同发生不同的变化. 若入射的脉冲为带啾啾的高斯脉冲, 则其光谱宽度 $\Delta\omega$ 可以表示为^[15]

$$\Delta\omega(z) \cong \Delta\omega_0 \frac{T_0}{T(z)} \frac{\sqrt{1+[C(z)+C_{\text{SPM}}(z)]^2 T^4(z)}}{\sqrt{1+C_0^2 T_0^4}}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\omega_0$, T_0 和 C_0 分别为脉冲的初始谱宽、脉宽及啾啾; $T(z)$ 为脉冲宽度, $C(z)$ 为色散引起的线性频率啾啾, $C_{\text{SPM}}(z)$ 为自相位调制引起的频率啾啾, 它们均为传播距离 z 的函数,

$$T(z) = T_0 \left[\frac{1+C_0^2 T_0^4 (1-z/z_0)^2}{1+C_0^2 T_0^4} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$C(z) = C_0 (1-z/z_0) T_0^2 / T^2(z), \quad (3)$$

$$C_{\text{SPM}}(z) = 2\gamma |E'_0|^2 z / T^2(z), \quad (4)$$

式中 z_0 表示光纤中脉冲宽度最小且啾啾为零时的位置, γ 为光纤的非线性参量,

$$E'_0 = E_0 \left[\frac{T_0}{T(z)} \right] \left[\frac{1-iC(z)T^2(z)}{1-iC_0 T_0^2} \right]^{1/2}$$

表示经过线性频率啾啾调制后的高斯脉冲振幅, E_0 为初始高斯脉冲振幅. 光谱宽度的变化为

$$\left. \frac{\partial \Delta\omega}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{2\Delta\omega_0 \gamma |E'_0|^2 C_0 T_0^2}{1+C_0^2 T_0^4}. \quad (5)$$

从 (5) 式可以看出, 当 C_0 为负值时, 谱宽的一阶导数也为负, 此时光谱逐渐被压缩. 因此带有负啾啾的高斯脉冲在光纤中传播时, 自相位调制会导致光谱发生压缩. 先用一段光纤为无啾啾初始脉冲提供负参量的预啾啾, 再让其在另一段具有正常色散的单模光纤中传播, 即可实现脉冲光谱压缩. 色散与非线性效应均可产生啾啾量, 由于多模光纤具有大芯径的特点, 可以在引入啾啾时避免非线性效应的影响, 所以本文选用多模光纤进行预啾啾. 在传输距离 z 之后, 色散效应引起的啾啾量由 C_1 变化为 C_2 , 计算公式为^[16]

$$C_2(z) = C_1 + (1+C_1^2)(\beta_2 z / T_0^2), \quad (6)$$

式中 β_2 为群速度色散参量. 可以看出当啾啾量从零开始变化时, 群速度色散参量 $\beta_2 < 0$ 可获得负啾啾量, 且啾啾量的大小与 β_2 的大小有关. 与阶跃型多模光纤相比, GI-MMF 激发模式数量较少且模间干扰小, 便于进行分析, 所以选用 GI-MMF 提供预啾啾.

2.2 GI-MMF 的模式平均群速度色散参量计算分析

光谱压缩过程发生在 SMF 中, 利用的是 SMF 中的基阶模式光, 而 SMF 中的基阶模式光是由 GI-MMF 输出的部分模式光 (部分模场能量分布在 SMF 纤芯内的模式) 组成的, 这些模式光的群速度色散不相同, 因此不只有惟一 β_2 可代入 (6) 式中计算. 为简化分析, 提出采用 GI-MMF 的群速度色散均值 $\bar{\beta}_2$ 作为啾啾参量分析的计算参数. GI-MMF 被激发的模式可以分为不同的模式群, 同一模式群中的各模式具有非常接近的传播常数^[17], 相应的群速度色散值也近似相等, 因此取每个模式群第 1 个模式的群速度色散值代表该模式群的群速度色散值, 假定 β_2^i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为第 i 个模式群的群速度色散值, N 为模式群数, η_i 为第 i 个模式群的

能量占比, 则

$$\bar{\beta}_2 = \sum_{i=1}^N \eta_i \beta_2^i, \quad (7)$$

式中 $\eta_i = \sum_{j=1}^M P_j^i / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_j^i$, P_j^i ($j = 1, 2, \dots, M$) 为第 i 个模式群的第 j 个模式单位时间单位长度的能量, M 为第 i 个模式群的模式总数, 采用时域有限差分法 (FDTD) 计算得到各模式, 根据能量分布图估计出 $P_j^i = \sum_{m=1}^K A_m J_m$, 其中 A_m ($m = 1, 2, \dots, K$) 为该模式第 m 个离散分布面积, K 为分布面积离散总数, J_m 为 A_m 对应的能量密度时间均值, 该公式适用于估计每个模式的能量. 另一方面, 连续改变输入光波长, 对第 i 个模式群的第 1 个模式进行计算, 可得到一系列有效折射率 n_{eff}^i , 获得 $n_{\text{eff}}^i - \lambda$ 曲线, 再根据公式 $\beta_2^i = [\lambda^3 / (2\pi c^2)] (d^2 n_{\text{eff}}^i / d\lambda^2)$ 计算得出 $\lambda - \beta_2^i$ 群速度色散曲线, 即可获得对应波长下的 β_2^i 值.

采用标准 50/125 μm GI-MMF 进行数值分析. 仿真分析参数如下: 包层折射率 $n_1 = 1.457$, 纤芯折射率 $n(r) = n_2 [1 - 2(n_2 - n_1)(r/a)^\alpha]^{1/2}$ ($n_2 = 1.472, a = 25 \mu\text{m}, \alpha = 2, 0 \mu\text{m} < r < 25 \mu\text{m}$), 入射光波长 $\lambda = 783 \text{ nm}$. 图 1 所示为前 20 个模式的归一化能量图, 图中相同颜色的模式属于同一模式群, 可以看出, 模式能量随阶次的增加而减小, LP_{34} 模式能量与基模 LP_{01} 相比已经很小了, 仅为 LP_{01} 模式能量的约 2%. 相比于高阶模式, 低阶模式能量占

据比重大, 因此为了简化计算, 忽略比 LP_{34} 模式更高阶的模式, 只采用前 20 种模式进行分析, 将其分为 8 个模式群 [18]. 另外, 由于脉冲光在经过 50 μm 芯径的 GI-MMF 以后会再进入芯径约为 5 μm 的 SMF 中, 芯径的差异将导致各模式的部分能量被滤掉, 所以只取每个模式分布在半径 2.5 μm 之内的能量, 进行各模式群能量占比 η_i 的计算, 结果如表 1 所示.

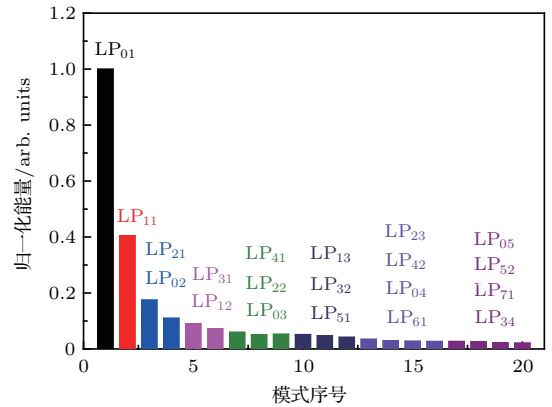
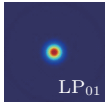
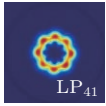
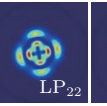
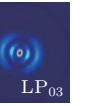


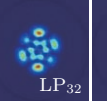
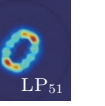
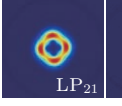
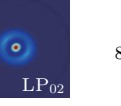


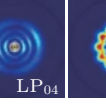
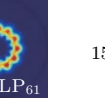
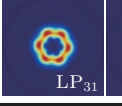



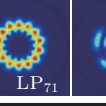



图 1 (网刊彩色) 前 20 个模式的归一化能量图
Fig. 1. (color online) The normalized energy of the first 20 modes.

图 2 所示为计算得出的上述 8 个模式群的 $\lambda - \beta_2^i$ ($i = 1-8$) 群速度色散曲线. 当入射波长为 783 nm 时, 由 (7) 式可得群速度色散均值 $\bar{\beta}_2 = -2.287 \times 10^{-5} \text{ fs}^2/\text{nm}$, $\bar{\beta}_2$ 为负值可为脉冲提供负啁啾量, 满足光谱压缩所需的预啁啾要求.

表 1 (网刊彩色) 模式群分类及其能量占比

Table 1. (color online) The classification and energy ratio of mode groups.

模式群编号	所含模式	能量占比 $\eta_i/\%$	模式群编号	所含模式	能量占比 $\eta_i/\%$
1	 LP ₀₁	58	5	 LP ₄₁  LP ₂₂  LP ₀₃	6
2	 LP ₁₁	0	6	 LP ₁₃  LP ₃₂  LP ₅₁	5
3	 LP ₂₁  LP ₀₂	8	7	 LP ₂₃  LP ₄₂  LP ₀₄  LP ₆₁	15
4	 LP ₃₁  LP ₁₂	1	8	 LP ₀₅  LP ₅₂  LP ₇₁  LP ₃₄	7

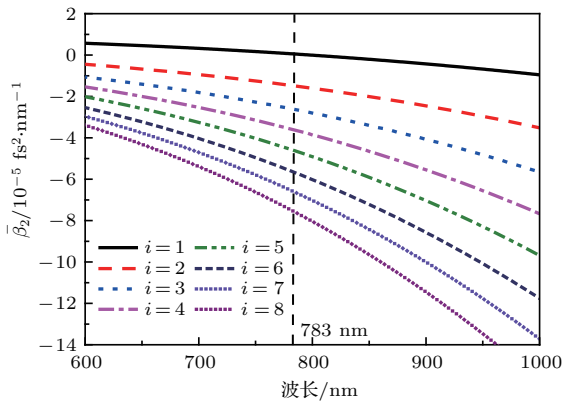


图2 (网刊彩色) 各模式群的群速度色散曲线图
Fig. 2. (color online) The group velocity dispersion curves of mode groups.

2.3 脉冲啁啾谱压缩计算分析

基于广义非线性薛定谔方程和分步傅里叶算法^[16]对飞秒脉冲(中心波长为783 nm, 脉宽120 fs, 峰值功率为5.42 kW)依次通过GI-MMF与SMF的输出光谱进行数值仿真. 假设在飞秒脉冲传输过程中GI-MMF的群速度色散均值 $\bar{\beta}_2$ 保持不变. SMF采用Nufern 780HP, 其参数 $\beta_2 = 4.79 \times 10^{-5} \text{ fs}^2/\text{nm}$, $\gamma = 0.16 \times 10^{-11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$. 输入脉冲光谱表达式为高斯型 $I(\lambda) = \exp[-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_0)^2 / w^2]$, 中心波长 $\lambda_0 = 783 \text{ nm}$, 光谱半峰全宽 $w = 13 \text{ nm}$, 计算时间窗口为3000 fs, 采样数目为 12^{12} , GI-MMF到SMF的理论损耗为20 dB, GI-MMF长度变化范围为0.4—2.4 m, 步长0.2 m, SMF长度保持2 m, 以 R_L 表示GI-MMF与SMF的长度比值, 其值在0.2—1.2范围内均匀变化. 图3(a)所示为初始输入光谱以及 R_L 分别为0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2时的输出光谱计算结果. 可以看到飞秒脉冲初始输入光谱谱宽(以半峰全宽 w 表示谱宽)为13.000 nm, 依次通过GI-MMF与SMF以后发生了啁啾谱压缩现象, 光谱宽度明显变窄, 且随着 R_L 的增大, 光谱压缩效果越来越明显, 谱宽逐渐变窄, 从(6)式可以看出这是由于随着GI-MMF长度的增加, GI-MMF所能提供的负参量预啁啾值也在增加, 即输入SMF时的初始啁啾量同时增加, 由(1)式可得光谱谱宽会随之减小. 另一方面, 输出光谱逐渐出现旁瓣结构, 这是由于频率啁啾参量在时域上非单调变化, 导致具有相同瞬时频率的不同脉冲分量发生干涉, 从而在频谱上出现旁瓣结构, 更窄的光谱谱宽会伴随更多的旁瓣^[19].

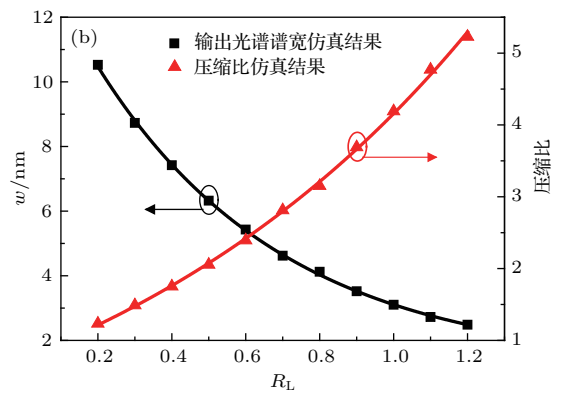
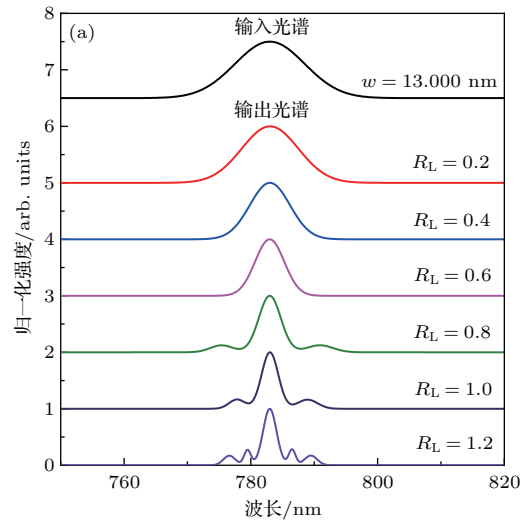


图3 (a) 不同 R_L 条件下的输出光谱仿真结果; (b) 输出光谱谱宽与谱宽压缩比随 R_L 的变化
Fig. 3. (a) Simulated output spectra with different R_L ; (b) spectral width and compression ratio of output spectrum versus R_L .

图3(b)所示为每个输出光谱的谱宽值及其一一对应的谱宽压缩比(输入谱宽与输出谱宽之比), 从图中可以看出, 随着 R_L 的增大, 输出光谱谱宽呈指数下降, 当 $R_L = 1.2$ 时, 谱宽达到最小值2.486 nm, 对应的压缩比为5.230. 通过上述分析可得仿真结果与理论相符, 实现了对输入脉冲的光谱压缩.

3 实验与结果分析

搭建实验系统, 对本文所述的全光纤啁啾谱压缩技术进行实验研究. 图4为实验系统示意图. 从飞秒光纤激光器输出的无啁啾空间脉冲光(峰值功率和仿真一致)通过光纤耦合器耦合进入GI-MMF中传输, 传输过程中获得负参量啁啾, 再进入2 m长的780HP SMF中传输实现脉冲光谱压缩, 最后

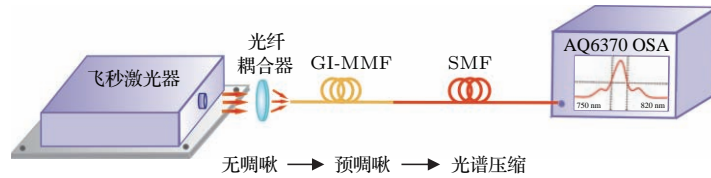


图4 实验系统示意图

Fig. 4. Schematic of the experiment setup.

采用光谱分析仪 (OSA, Yokogawa AQ6370, 光谱分辨率为0.02 nm) 测量记录光谱信息. 实验分别使用 50/125 μm , 62.5/125 μm 以及 105/125 μm 三种 GI-MMF 与 SMF 进行熔接, 熔接损耗分别为 20.1 dB, 22.6 dB 以及 26.7 dB, 后续实验可通过改进 GI-MMF 与 SMF 的熔接方式来降低熔接损耗, 比如在 GI-MMF 与 SMF 的熔接点处进行拉锥处理^[20] 或对 SMF 靠近熔接点处的区域进行局部增大芯径的热处理^[21]. 实验中, 三种 GI-MMF 长度变化范围均为 0.4—2.4 m, 步长 0.2 m.

3.1 GI-MMF与SMF长度比值对光谱压缩效果的影响

图 5 (a) 所示为原始输入光谱以及 50/125 μm GI-MMF 与 SMF 长度比值分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 时的输出光谱实验结果. 可以看出输出光谱的实验结果变化趋势与仿真结果一致, 随着 R_L 的增大压缩效果越来越明显, 同时旁瓣逐渐增加, 当 R_L 为 1.2 时, 谱宽达到最小值 2.243 nm, 对应的压缩比为 5.796. 与仿真结果不同的是, 在同一 R_L 下实验结果中出现了更多的旁瓣, 也使得压缩后的谱宽更窄, 这是因为在仿真中忽略了高阶色散的影响, 而实际上高阶色散也会导致旁瓣的产生^[14]. 另一方面, 与仿真结果相比, 实验输出光谱图的中心波长发生了小范围浮动, 浮动范围为 0.743—0.569 nm, 如图 5 (b) 所示, 这可能是由于实验过程中不同长度的 GI-MMF 受外力影响发生了不同程度的微弯, 导致模式间的能量耦合发生了变化, 从而引起输出光谱中心波长的浮动^[22], 可通过严格控制 GI-MMF 光纤的弯曲度降低影响. 相比于输入光谱较宽的谱宽范围, 这种中心波长的微小波动可以忽略.

3.2 GI-MMF纤芯直径改变对光谱压缩效果的影响

不同纤芯直径的 GI-MMF 具有不同的群速度色散值以及非线性参量, 这会引起光脉冲在传输过

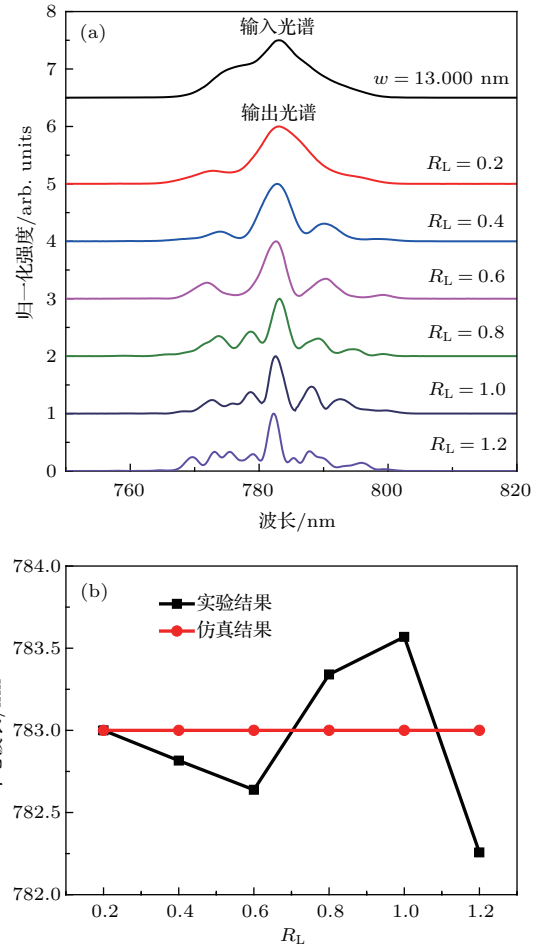


图5 (a) 不同 R_L 条件下的输出光谱实验结果; (b) 输出光谱中心波长随 R_L 的变化

Fig. 5. (a) Experimental output spectra with different R_L ; (b) central wavelength of output spectrum versus R_L .

程中发生不同的色散效应和自相位调制效应, 从而导致输出光谱压缩效果不同. 因此, 分别对纤芯直径为 50, 62.5, 105 μm 的 GI-MMF 进行对比分析. 图 6 (a) 为原始输入光谱, 图 6 (b)—图 6 (d) 所示为 $R_L = 1.2$ 时, 分别使用三种不同纤芯直径的 GI-MMF 得到的输出光谱. 从图中可以看出, 使用不同纤芯直径的 GI-MMF 与 SMF 组合均能对输入光谱进行压缩, 且随着纤芯直径增大, 输出光谱谱宽变窄, 同时旁瓣增加. 使用 105/125 μm 的 GI-MMF 可以得到最窄的输出光谱谱宽, 使用

50/125 μm 的 GI-MMF 时谱宽为前者的 26.388 倍。这是因为 105/125 μm 多模光纤纤芯直径最大, 模式最多, 有效模场面积最大, 从而具有最大的群速度色散值以及最小的非线性参量, 能够在获得最多预啁啾量的同时受到最小的自相位调制影响, 故使用 105/125 μm 的多模光纤能够获得最好的压缩效果。另外, 从图 6 所示实验结果来看, 输出光谱

均存在旁瓣过高的情况, 这是因为脉冲光在通过 GI-MMF 后激发出多种模式进入后续 SMF 中, 此时出现的旁瓣结构是每种模式造成的旁瓣共同叠加的结果。旁瓣过高会影响 CARS 光谱质量, 考虑到压缩后的光谱谱宽较窄, 可以在后续系统中使用光纤光栅滤出主峰, 从而降低旁瓣对后续应用的影响。

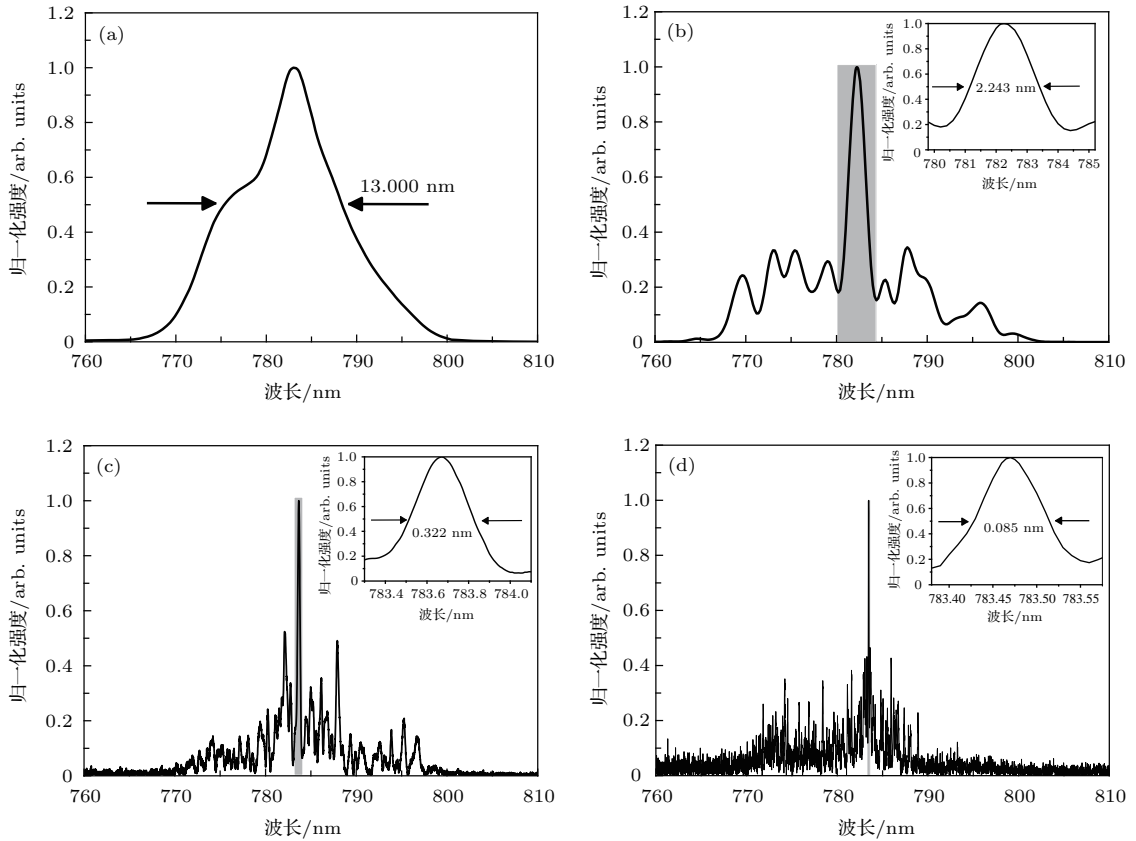


图 6 $R_L = 1.2$ 时使用三种不同芯径 GI-MMF 得到的输出光谱 (a) 原始输入光谱; (b) 50/125 μm ; (c) 62.5/125 μm ; (d) 105/125 μm

Fig. 6. Experimental output spectra of GI-MMFs with three different core diameters when R_L is 1.2: (a) Original spectrum; (b) 50/125 μm ; (c) 62.5/125 μm ; (d) 105/125 μm .

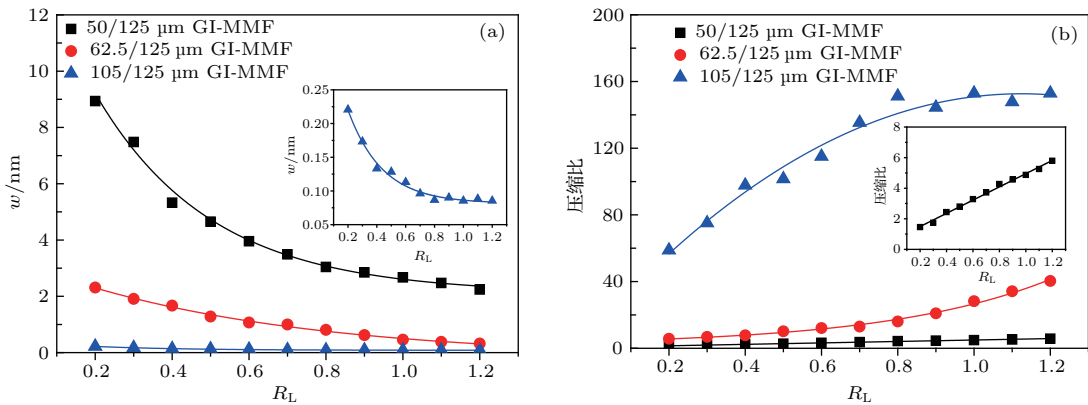


图 7 使用不同纤芯直径 GI-MMF 时 (a) 输出光谱谱宽及 (b) 谱宽压缩比随 R_L 的变化

Fig. 7. (a) Full width at half maximum and (b) compression ratio of output spectrum versus R_L when GI-MMFs with different core diameters are used.

图7为采用三种GI-MMF进行实验所获得的输出光谱谱宽值以及谱宽压缩比随 R_L 变化的曲线. 随着 R_L 的增大, 输出光谱谱宽均呈指数下降, 下降速度逐渐变缓, 而相应的压缩比逐渐增大. 对于105/125 μm 的GI-MMF, 当 R_L 增加到0.8以后, 输出光谱谱宽变化平缓, 输出光谱最小谱宽为0.085 nm. 对于50/125 μm 的GI-MMF, 压缩比近似呈直线上升, 对于62.5/125 μm 和105/125 μm 的GI-MMF, 压缩比呈非线性上升, 其中105/125 μm 的GI-MMF谱宽压缩比变化曲线逐渐趋于饱和, 可获得的最大压缩比为152.941.

4 结 论

针对CARS应用进行了多模/单模光纤组合的全光纤飞秒脉冲光谱啁啾压缩研究. 提出利用多模光纤的群速度色散均值作为啁啾参量分析的计算参数, 仿真计算了50/125 μm GI-MMF的群速度色散均值及其与780HP SMF不同长度比值下的光谱压缩效果, 获得最小谱宽为2.486 nm, 压缩比为5.230. 搭建实验系统并分别使用50/125 μm , 62.5/125 μm 以及105/125 μm 三种GI-MMF进行实验, 实验结果显示, 使用50/125 μm GI-MMF可获得最小谱宽2.243 nm, 对应的压缩比为5.796, 与理论仿真一致. 对比分析了使用三种GI-MMF的实验结果, 其中使用105/125 μm GI-MMF可获得最小输出谱宽为0.085 nm的脉冲, 对应最大压缩比为152.941. 将此脉冲用于CARS探测, 理论光谱分辨率可达 1.386 cm^{-1} . 研究的全光纤飞秒脉冲光谱啁啾压缩方法具有高压缩比、结构简单、光谱压缩比可控等特点, 光纤熔接损耗带来的影响可通过提高输入脉冲功率或改进GI-MMF与SMF的熔接方式得以解决, 为全光纤高光谱分辨率CARS激发源的研究打下基础.

参考文献

- [1] Xu C, Wise F W 2013 *Nature Photon.* **7** 875
- [2] Saint-Jalm S, Berto P, Jullien L, Andresen E R, Rigneault H 2014 *J. Raman Spectrosc.* **45** 515
- [3] Chen K, Wu T, Wei H Y, Li Y 2016 *Opt. Lett.* **41** 2628
- [4] Jiang J F, Wu H, Liu K, Wang S, Huang C, Zhang X Z, Yu Z, Chen W J, Ma Z, Hui R Q, Jia W J, Liu T G 2017 *Chin. J. Lasers* **44** 0101002 (in Chinese) [江俊峰, 吴航, 刘琨, 王双, 黄灿, 张学智, 于哲, 陈文杰, 马喆, 惠荣庆, 贾文娟, 刘铁根 2017 中国激光 **44** 0101002]
- [5] Lamb E S, Wise F W 2015 *Biomed. Opt. Express* **6** 3248
- [6] Oberthaler M, Höpfel R A 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1017
- [7] Washburn B R, Buck J A, Ralph S E 2000 *Opt. Lett.* **25** 445
- [8] Andresen E R, Thøgersen J, Keiding S R 2005 *Opt. Lett.* **30** 2025
- [9] Limpert J, Gabler T, Liem A, Zellmer H, Tnnermann A 2002 *Appl. Phys. B* **74** 191
- [10] Fedotov A B, Voronin A A, Fedotov I V, Ivanov A A, Zheltikov A M 2009 *Opt. Lett.* **34** 662
- [11] Nishizawa N, Takahashi K, Ozeki Y, Itoh K 2010 *Opt. Express* **18** 11700
- [12] Chuang H P, Huang C B 2011 *Opt. Lett.* **36** 2848
- [13] Chao W T, Lin Y Y, Peng J L, Huang C B 2014 *Opt. Lett.* **39** 853
- [14] Toneyan H, Zeytunyan A, Zadoyan R, Mouradian L 2016 *J. Phys.* **672** 012016
- [15] Planas S A, Pires N L, Brito C H, Fragnito H L 1993 *Opt. Lett.* **18** 699
- [16] Agrawal G P 2009 *Nonlinear Fiber Optics* (Amsterdam: Elsevier) pp37–44, 56–57
- [17] Nishashi K, Koike Y 2009 *Proc. SPIE* **7213** 721318
- [18] Liu Y, Rahman B M A, Ning Y N, Grattan K T V 1995 *Appl. Opt.* **34** 1540
- [19] Finot C, Boscolo S 2016 *J. Opt. Soc. Am. B* **33** 760
- [20] Mortimore D B, Wright J V 1986 *Electron. Lett.* **22** 318
- [21] O'Brien E M, Hussey C D 1999 *Electron. Lett.* **35** 168
- [22] Su L, Chiang K S, Lu C 2006 *Appl. Opt.* **44** 7394

All-fiber spectral compression of femtosecond pulse for coherent anti-Stokes Raman scattering excitation source*

Jiang Jun-Feng[†] Huang Can Liu Kun Zhang Yong-Ning Wang Shuang Zhang Xue-Zhi
Ma Zhe Chen Wen-Jie Yu Zhe Liu Tie-Gen

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of the Ministry of Education, Institute of Optical Fiber Sensing, Tianjin Optical Fiber Sensing Engineering Center, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 24 March 2017; revised manuscript received 8 June 2017)

Abstract

Coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) imaging of femtosecond pulses has been a research hotspot in recent years, but the wide spectrum of the femtosecond pulse limits the spectral resolution of CARS imaging. Spectral compression is considered as an effective method to solve this problem. In this work, an all-fiber chirp spectral compression method of graded-index multi-mode fiber/single-mode fiber (GI-MMF/SMF) structure based on fiber pre-chirp and self-phase modulation is presented. It can be used as a CARS excitation source to increase the spectral resolution of CARS imaging. In the section of numerical simulation, the mean group velocity dispersion value of GI-MMF is used as a numerical parameter of the chirp analysis, which is estimated by analyzing modes of GI-MMF. On one hand, the mode field distributions in GI-MMF are simulated numerically by the finite-difference time-domain method, and these different modes are divided into eight mode groups. On the other hand, the energy proportion of each mode group is regarded as a weight value. Then we can obtain a mean group velocity dispersion value of 50/125 μm GI-MMF, which is $-2.287 \times 10^{-5} \text{ fs}^2/\text{nm}$, by calculating the sum of group velocity dispersion weight values of mode groups. The results of spectral compression with different length ratios of 50/125 μm GI-MMF to 780HP SMF are also analyzed based on the generalized nonlinear Schrödinger equation and split-step Fourier algorithm. The spectral width of 2.486 nm and the compression ratio of 5.230 are calculated, when the length ratio of 50/125 μm GI-MMF to 780HP SMF is 1.2. In the section of experiment, three kinds of GI-MMFs with different core diameters are used in the experiment, the influences of the core diameter and the length ratio of GI-MMF to 780HP SMF on the spectral compression are investigated. The results show that the spectral width of 2.243 nm, corresponding to the compression ratio of 5.796 is obtained, when the length ratio of 50/125 μm GI-MMF to 780HP SMF is 1.2, which is consistent with the simulation result. Under the condition of the same length ratio, the use of 105/125 μm GI-MMF can raise the compression ratio to 152.941, and the spectral width of output pulse is 0.085 nm. When the pulse is applied to CARS spectrum detection, the theoretical spectral resolution can be 1.386 cm^{-1} . The experimental results show that the spectral compression way to improve spectral resolution of CARS imaging is effective. This spectral compression system is characterized by simple structure, and high and controllable compression ratio, which provides theoretical and experimental basis for the all-fiber high spectral resolution CARS excitation source research.

Keywords: nonlinear fiber optics, fiber pre-chirp, self-phase modulation, spectral compression

PACS: 42.81.-i, 42.65.-k, 42.65.Dr

DOI: 10.7498/aps.66.204207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61378043, 61675152, 61227011, 61475114, 61505139), the National Instrumentation Program of China (Grant No. 2013YQ030915), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 13JCYBJC16200), and the Shenzhen Science and Technology Research Project, China (Grant No. JCYJ20120831153904083).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangjfjxu@tju.edu.cn