

## 基于色散管理的自相位调制光谱展宽滤波技术

王井上 王栋梁 常国庆

### Dispersion management dual-pass self-phase modulation-enabled spectral selection

Wang Jing-Shang Wang Dong-Liang Chang Guo-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 094205 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230088

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230088>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 窄线宽脉冲光纤激光的自相位调制预补偿研究

Self-phase modulation pre-compensation of narrowlinewidth pulsed fiber lasers

物理学报. 2018, 67(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180486>

#### 基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

#### 基于自相位调制光谱选择驱动的多标记自发荧光多倍频显微镜系统

Simultaneous label-free autofluorescence-multiharmonic microscopy driven by femtosecond sources based on self-phase modulation enabled spectral selection

物理学报. 2022, 71(10): 104204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212282>

#### 高效率三倍频产生355 nm皮秒激光的实验研究

Efficient third harmonic generation of 355 nm picosecond laser pulse

物理学报. 2019, 68(12): 124205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190513>

#### 正常色散高非线性石英光纤优化设计及平坦光频率梳产生

Design of normal dispersion high nonlinear silica fiber and generation of flat optical frequency comb

物理学报. 2022, 71(23): 234209 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221115>

#### 相干彩虹的形成机制

Formation mechanism of coherent rainbows

物理学报. 2018, 67(18): 184204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180888>

## 基于色散管理的自相位调制光谱展宽滤波技术\*

王井上<sup>1)2)</sup> 王栋梁<sup>1)2)</sup> 常国庆<sup>1)2)3)†</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2023 年 1 月 17 日收到; 2023 年 2 月 27 日收到修改稿)

自相位调制光谱滤波技术能够产生波长可调谐的飞秒脉冲, 有望取代传统复杂的光参量振荡器而受到关注. 然而, 光纤中的正色散会导致光谱旁瓣调制深度减小, 同时光波分裂现象阻碍了光谱的展宽. 为了解决这两个问题, 本文提出了一种基于色散管理的双通光谱滤波技术, 在脉冲演化过程中通过引入负色散来优化脉冲的前后沿形状, 并压缩脉冲宽度以提升脉冲的峰值功率, 所产生的光谱不仅旁瓣更加清晰, 而且调制深度更深. 使用 2 cm LMA-8 光纤, 利用该技术获得了脉冲能量为 6 nJ、中心波长在 920 nm 的 113 fs 脉冲.

**关键词:** 超快光纤激光, 自相位调制, 频率变换**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.-i**DOI:** 10.7498/aps.72.20230088

## 1 引言

当变换极限脉冲在光纤中传播时, 克尔非线性会导致脉冲经历自相位调制 (SPM)<sup>[1]</sup> 效应. 如果光纤具有正群速度色散 (GVD), 则 SPM 会导致光谱展宽, 因此脉冲会产生正啁啾, 通过光栅对等色散补偿元件可以获得比初始输入脉冲短得多的压缩脉冲<sup>[2,3]</sup>. 在具有负色散的光纤中, 由于高阶孤子自压缩<sup>[4]</sup> 效应, 在脉冲传输的初始阶段, 脉冲宽度持续减小, 光谱变宽. 除了脉冲压缩之外, 光纤中由于 SPM 产生的光谱展宽效应在脉冲再生<sup>[5-9]</sup>、超快光信号处理和测量<sup>[10-12]</sup> 以及低噪声超连续谱产生<sup>[13-15]</sup> 中具有广泛应用. 如果色散在光谱展宽过程中起到较弱的作用, 那么由 SPM 展宽后的光谱包含若干个明显分立的光谱旁瓣, 旁瓣的数目则正比于脉冲因 SPM 而积累的非线性相移. 采用合适的光学滤波器选择最左边或最右边的光谱旁瓣

会产生接近变换极限的脉冲, 而改变耦合到光纤中的脉冲能量, 可以连续调谐最左边/最右边光谱旁瓣的峰值波长<sup>[16]</sup>. 这种利用 SPM 的光谱选择技术简称为 SPM 光谱滤波 (SPM-enabled spectral selection, SESS), 可以产生百飞秒量级的超短脉冲<sup>[16]</sup>. 例如, 基于 1030 nm 的掺镱光纤超快激光器 SESS 光源可产生约 100 fs 脉冲, 其中心波长可在 825—1210 nm 范围内调谐<sup>[16]</sup>, 所引入的相对定时抖动仅有约 0.1 fs<sup>[17,18]</sup>. 2017 年和 2018 年, Chung 等<sup>[17,19]</sup> 发展了基于超快掺铒光纤激光的 SESS 光源, 产生的飞秒脉冲的调谐范围为 1300—1700 nm. 这些波长可调谐光源已应用于生物医学成像<sup>[20-22]</sup> 和产生高功率长波中红外飞秒脉冲<sup>[23]</sup>.

一般常见的 SESS 装置如图 1(a) 所示: 光束通过半波片与偏振光束分束器 (polarization beam splitter, PBS) 控制入射脉冲的能量, 随后经过光学透镜耦合到一段光纤中, 利用 SPM 效应展宽脉冲光谱获得分立的光谱旁瓣. 通过转动 PBS 之前

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB3602602) 和国家自然科学基金 (批准号: 62175255, 62227822) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guoqing.chang@iphy.ac.cn

的半波片改变入射到光纤中的脉冲能量, 可以连续调节最左边和最右边光谱旁瓣的位置. 光纤输出的光束经过另一个光学透镜准直后, 再由光学滤波器选出最左边或者最右边的光谱旁瓣, 即可以产生中心波长随入射能量改变而连续可调的飞秒脉冲. 这种传统 SESS 方案的光谱展宽程度受到光纤色散的限制: 在负色散光纤中脉冲演化时由于孤子分裂导致光谱展宽有限, 同时光谱最大展宽量小于相同 GVD 数值的正色散光纤<sup>[24]</sup>, 所以目前 SESS 光源大多采用正色散光纤用于光谱展宽. 在正色散光纤中, 由于二阶色散与 SPM 效应的相互作用, 时域脉冲的前沿和后沿会逐渐变得陡峭并出现振荡结构, 脉冲的光谱则在两侧出现基底, 阻碍光谱的继续展宽, 这就是光波分裂 (optical wave breaking, OWB) 效应. 除了降低光谱展宽范围之外, 二阶正色散还会降低光谱的调制深度, 甚至让光谱旁瓣趋于消失. 为了克服二阶正色散对光谱展宽范围和光谱旁瓣对比度的限制, 本文提出一种新的 SESS 方案, 如图 1(b) 所示: 在光束耦合到正色散光纤前, 利用 1/4 波片将其偏振态由线偏振调整为圆偏振, 使用圆偏振光可以提高耦合到光纤中的脉

冲能量, 得到相同的展宽光谱所需要的能量一般为线偏振光的 1.4 倍<sup>[25]</sup>. 此处 1/4 波片的主要功能是让第二通的光脉冲与第一通的光脉冲具有垂直的偏振状态, 从而能够利用光纤入射端的 PBS 导出第二通的光脉冲. 输出光束通过准直透镜后利用啁啾镜将光束原路返回耦合到光纤中, 返回的光束再一次经过 1/4 波片后变为线偏振光, 但与输入光束的偏振方向垂直, 通过 PBS 另外一端输出. 本文利用数值仿真与实验相结合, 证明引入负色散啁啾镜将大大改善 SESS 光源. 具体而言, 前向传输的脉冲经历正色散光纤再由负色散啁啾镜反射后, 不仅脉冲变短, 让第二通脉冲演化时积累更多的非线性相位, 从而产生更宽的光谱; 而且脉冲的前后沿形状也会得到优化, 使光波分裂时间延后, 从而得到调制深度更深的光谱旁瓣. 我们首次将色散管理技术引入到 SESS 技术中, 采用双通结构在于可以比较方便地在装置中加入啁啾镜这种反射式色散补偿器件.

## 2 模拟部分

首先通过数值求解非线性薛定谔方程来研究色散补偿在双通 SESS 中的作用. 在数值模拟中, 让 15 nJ, 100 fs 的高斯脉冲在模场直径 7.5  $\mu\text{m}$  的光纤中传输, 光纤的 GVD 假定为  $\beta_2 = 10 \text{ fs}^2/\text{mm}$ , 同时只考虑二阶色散与 SPM 效应. 研究如下三种情况: 1) 脉冲在 4 cm 光纤中单通传输; 2) 光源耦合到 2 cm 长的光纤中, 然后沿原路返回, 在此过程中假定有 50% 的耦合损耗; 3) 光源首先经过 2 cm 光纤, 接着由啁啾镜补偿 -300  $\text{fs}^2$  的二阶色散后沿原路返回, 在此过程中假定有 50% 的耦合损耗. 具体而言, 我们的模拟分两步进行: 第一步先通过分步傅里叶变换法求解非线性薛定谔方程, 仿真标准函数形式的脉冲在光纤中传输 2 cm; 第二步中, 将第一步所产生的 2 cm 处的输出结果, 或衰减或经过负色散补偿, 然后作为输入脉冲再次传输 2 cm. 图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c) 为三种情况下的光谱演化情况, 在 0—2 cm 阶段, 三者具有相同的光谱演化; 在 2—4 cm 阶段, 由于引入了耦合损耗和色散补偿, 脉冲积累不同的非线性相移, 因此光谱演化明显不同. 图 2(d)、图 2(e) 和图 2(f) 则展示了三种情况下时域脉冲在 2—4 cm 阶段的演化. 具体而言, 图 2(a) 和图 2(d) 为情况 1) 下的仿真

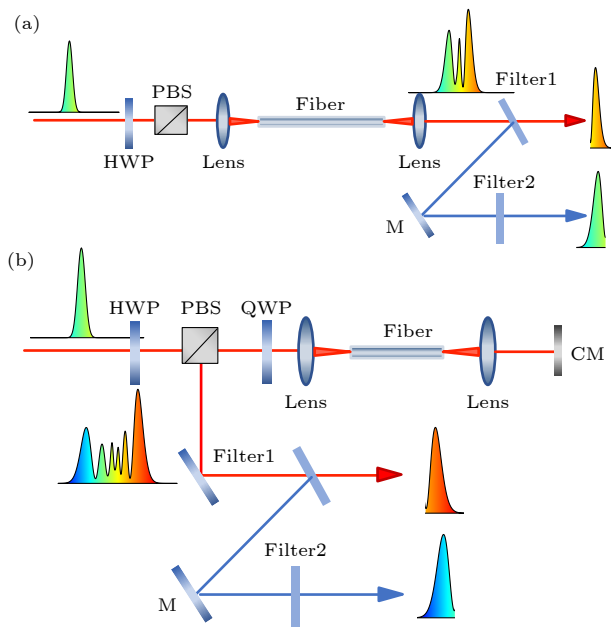


图 1 (a) 单通 SESS 与 (b) 色散管理双通 SESS 装置示意图 (PBS, 偏振光束分束器; Lens, 光学透镜; HWP, 半波片; QWP, 1/4 波片; CM, 啁啾镜; M, 反射镜)

Fig. 1. Schematic diagram of single-pass SESS (a) and dual-pass SESS (b) devices (PBS, polarizing beam splitter; Lens, optical lens; HWP, half-wave plate; QWP, quarter-wave plate; CM, chirped mirror; M, Mirror).

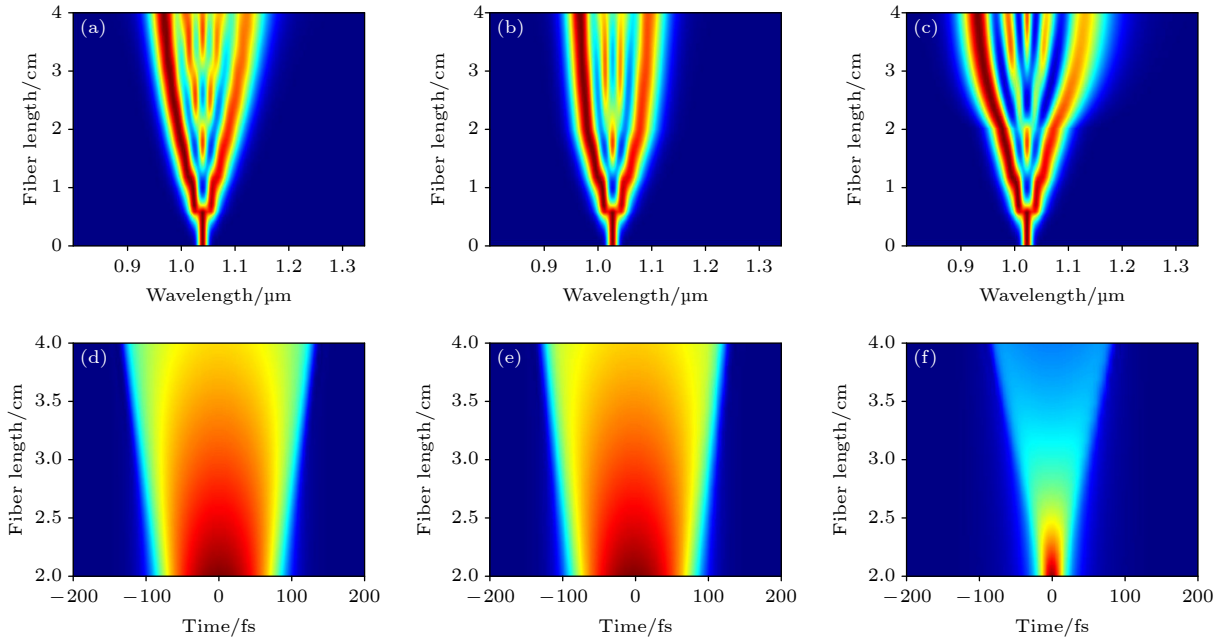


图 2 15 nJ, 100 fs 脉冲在不同情况下的光谱演化曲线 (a) 情况 1), 单通 4 cm 光纤; (b) 情况 2), 通过 2 cm 光纤后假定脉冲能量损耗 50% 后, 第二次经过 2 cm 光纤; (c) 情况 3), 通过 2 cm 光纤后假定脉冲能量损耗 50% 以及补偿  $-300 \text{ fs}^2$  色散后, 第二次经过 2 cm 光纤; (d), (e), (f) 分别对应图 (a)、图 (b) 和图 (c) 最后 2 cm 光纤的脉冲演化图. 光纤  $\beta_2 = 10 \text{ fs}^2/\text{mm}$

Fig. 2. Spectral evolution curves of 15 nJ, 100 fs pulses under different conditions: (a) Situation 1), single-pass 4 cm fiber; (b) situation 2): after passing through 2 cm fiber, assuming that the pulse energy loss is 50%, the second time passes through 2 cm fiber; (c) situation 3), passing 2 cm after the optical fiber, it is assumed that the pulse energy loss is 50% and after the  $-300 \text{ fs}^2$  dispersion is compensated, it passes through the 2 cm optical fiber for the second time; (d), (e), (f) correspond to the pulse evolution diagrams of the last 2 cm fiber of panels (a), (b) and (c), respectively. Fiber  $\beta_2 = 10 \text{ fs}^2/\text{mm}$ .

结果, 从图 2(a) 所示的光谱演化图可见, 随着光纤长度增加, SPM 导致光谱逐渐展宽. 图 2(d) 则显示了经过 2 cm 的光纤后脉冲演化的结果, 脉冲宽度由初始的 100 fs 展宽到 2 cm 处的 156 fs, 最后的输出脉冲宽度为 252 fs, 脉冲宽度在正二阶色散影响下逐渐增加. 图 2(b) 和图 2(e) 为情况 2) 的仿真结果, 图 2(b) 所示是双通 2 cm 光纤时光谱演化情况, 第一通光谱与脉冲演化与图 2(a) 前半段完全相同, 第二通由于有 50% 的损耗, 后半段峰值功率降低致使 SPM 效应减弱, 所以输出光谱宽度小于图 2(a) 所示的光谱宽度; 图 2(e) 显示了第二通脉冲演化情况, 脉冲宽度由初始的 100 fs 增加到 2 cm 处的 156 fs, 最后的输出脉冲宽度为 236 fs, 这主要是第二通 SPM 效应减弱导致光谱宽度减少, 在经历色散量一定的情况下输出脉冲宽度也会减小. 第三种情况的模拟结果如图 2(c) 和图 2(f) 所示, 脉冲宽度由初始的 100 fs 扩展到 2 cm 处的 156 fs, 接着补偿  $-300 \text{ fs}^2$  色散后脉冲宽度变为 36 fs, 尽管在 2—4 cm 阶段传输时存在 50% 的耦合损耗, 脉冲的峰值功率大大超过情况 1) 时的脉冲峰

值功率, 因此在 2—4 cm 阶段能够积累更多的非线性相移, 光谱展宽最多. 值得注意的是, 在 2 cm 传输后补偿  $-300 \text{ fs}^2$  色散不仅减小了脉冲宽度, 而且改变了脉冲形状, 减缓了脉冲的前后沿的陡峭程度, 因此, 能够克服 OWB 效应, 从而提升光谱旁瓣的调制深度.

为了更加直观地对比三种情况, 将图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c) 末端输出光谱绘制在图 3 中. 由图 3 可以发现, 由于二阶色散的作用, 单通 4 cm 光纤 (红色曲线) 的输出光谱的调制深度减小, 旁瓣不清晰. 仅双通 2 cm 光纤且损耗 50% 的输出光谱 (蓝色曲线) 由于脉冲能量降低, 导致积累非线性减小和光谱展宽量下降. 在此基础上, 补偿  $-300 \text{ fs}^2$  的二阶色散, 将会得到黑色曲线所示的光谱, 不仅可以获得更宽的光谱, 而且光谱最外层旁瓣的调制深度增加, 有利于后续通过滤出光谱旁瓣而产生 SESS 脉冲.

为了展示基于色散管理的双通 SESS 的优势, 在以上数值仿真中假定光纤仅有二阶色散, 但在实际中要考虑到光纤的高阶色散. 在实验中, 为了获



得高能量的 SESS 光源, 通常采用大模场 (large mode area, LMA) 光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF). 例如, Liu 等<sup>[26]</sup> 在实验中使用商用 LMA-8 光纤可以得到中心波长在 1030—1215 nm 之间可调谐、脉冲宽度小于 100 fs 的近变换极限脉冲, 脉冲能量达到 20 nJ. LMA-8 光纤色散曲线如图 4 中蓝色曲线所示, 该光纤的色散零点大约位于 1150 nm 处, 模场直径为 7.5  $\mu\text{m}$ . 图 4 插图为该光纤的横截面图.

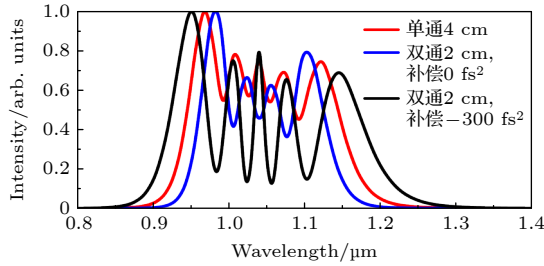


图 3 15 nJ, 100 fs 输入脉冲在光纤末端产生的输出光谱. 其中红线、蓝线和黑线分别对应单通 4 cm 光纤; 通过 2 cm 光纤后假定脉冲能量损耗 50% 后, 第二次经过 2 cm 光纤; 通过 2 cm 光纤后假定脉冲能量损耗 50% 以及补偿 -300  $\text{fs}^2$  色散后, 第二次经过 2 cm 光纤

Fig. 3. 15 nJ, 100 fs input pulse produces output spectra at the end of the fiber. The red line, blue line, and black line represent respectively single-pass 4 cm fiber; after passing through 2 cm fiber and assuming 50% pulse energy loss, the second pass through 2 cm fiber; after passing through 2 cm fiber assuming 50% pulse energy loss and compensating for -300  $\text{fs}^2$  dispersion, the second pass through 2 cm fiber.

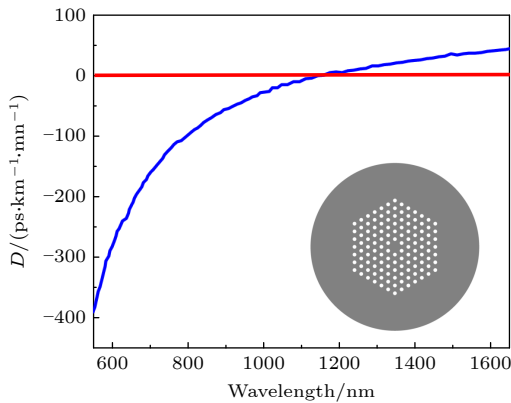


图 4 LMA-8 光纤色散曲线 (蓝线), 插图为光纤横截面  
Fig. 4. Dispersion curve (blue line) of LMA-8 fiber. Inset: fiber cross section.

在实验中, 将利用 LMA-8 光纤来实现基于色散管理的双通 SESS 光源. 为了更好地指导实验, 首先进行了数值仿真: 假设将能量为 20 nJ、宽度为 100 fs 的高斯脉冲耦合到长度为 2 cm 的 LMA-8

光纤中, 同时假设双通损耗为 50%. 图 5(a)、图 5(c)、图 5(e) 和图 5(g) 展示了在啁啾镜补偿色散量分别为 0, -150, -300 和 -450  $\text{fs}^2$  情况下双通后输出的光谱; 图 5(b)、图 5(d)、图 5(f) 和图 5(h) 展示了单通补偿色散后将要第二通传输时的时域脉冲. 图 5(a) 中的结果表明, 当补偿色散为 0  $\text{fs}^2$  时, 输出光谱尤其是短波旁瓣明显受到二阶正色散的影响, 调制深度减小且旁瓣不清晰. 图 5(b) 记录了经过单通 LMA-8 光纤的脉冲 (也就是脉冲在 LMA-8 中传输了 2 cm), 脉冲的半高全宽为 176 fs, 与初始的高斯脉冲相比, 此时脉冲前后沿变陡, 因此在原路返回第二次经过 LMA-8 光纤时, 会使得光谱左侧会出现 OWB, 阻止光谱向短波方向进一步展宽. 如图 5(a) 所示, 此时最左边和最右边旁瓣的峰值分别位于 977 nm 和 1146 nm. 如果使用后置二阶色散为 -150  $\text{fs}^2$  的啁啾镜, 如图 5(d) 所示, 第二通输入脉冲不仅宽度从 176 fs 减小为 84 fs, 而且脉冲前后沿的陡峭程度有所减弱, 这两方面均有利于第二通时的光谱展宽. 由图 5(c) 可见, 输出光谱的左右旁瓣峰值波长都向两侧移动, 此时最左边和最右边旁瓣的峰值分别位于 970 nm 和 1193 nm. 当进一步增加啁啾镜的负色散到 -300  $\text{fs}^2$  时, 双通之前的脉冲进一步变窄, 宽度减小为 24 fs (如图 5(f) 所示), 第二通 SPM 效应显著增强. 在这种情况下, 如图 5(e) 所示, 整个光谱主要由两个清晰旁瓣组成, 最左边旁瓣向短波长方向移动到 920 nm, 最右边旁瓣则向长波长方向移动到 1550 nm. 如果将啁啾镜提供的负色散继续增加到 -450  $\text{fs}^2$ , 脉冲宽度变为仅 14 fs (如图 5(h) 所示), 而且脉冲后沿出现快速振荡结构, 在第二通传输过程中发生脉冲分裂, 输出光谱结构变得复杂, 演变为超连续谱 (如图 5(g) 所示). 以上仿真结果表明, 对于确定的输入脉冲参数 (脉冲宽度和能量) 和光纤参数 (模场直径、长度和色散), 存在一个最佳的补偿色散值, 让色散补偿后的脉冲在第二通传输后不仅增加光谱展宽量, 而且具有明显的光谱旁瓣. 由于脉冲在光纤中的演化是一个复杂的非线性过程, 目前还只能通过模拟仿真确定该色散值.

### 3 实验系统及实验结果

在以上仿真结果的指导下, 搭建了如图 6 所示的实验装置. 种子源为中心波长为 1040 nm、重复

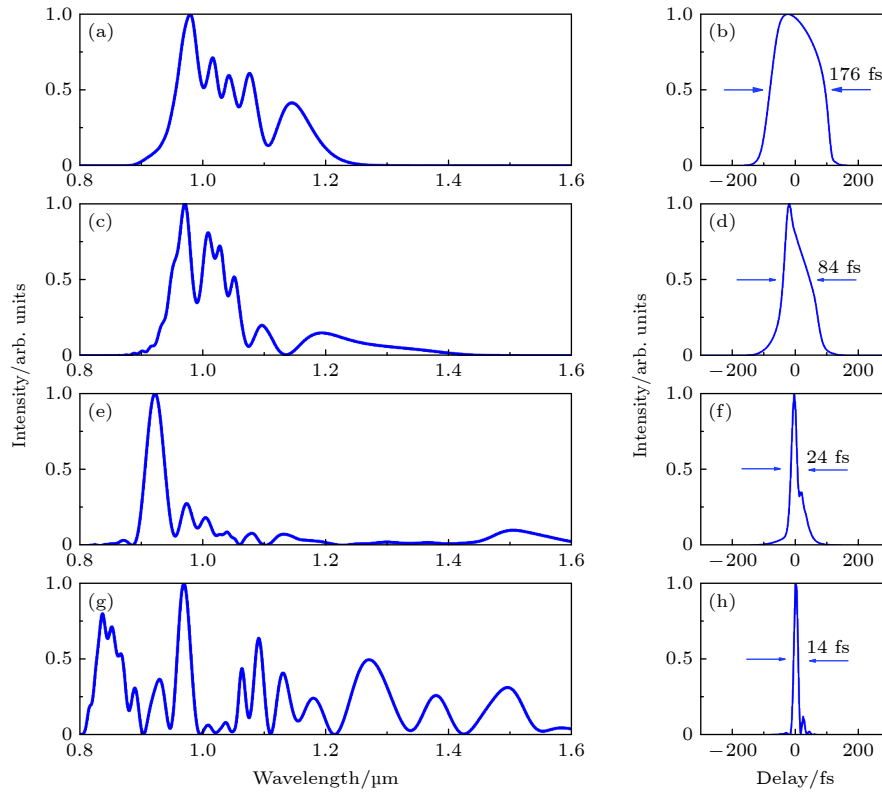


图 5 20 nJ, 100 fs 输入脉冲在双通 2 cm LMA-8 光纤后产生的输出光谱与单通补偿色散后的脉冲 (a), (c), (e), (g) 补偿 0, -150, -300 和 -450  $\text{fs}^2$  色散后输出光谱; (b), (d), (f), (h) 单通补偿相应色散后的脉冲

Fig. 5. Output spectra generated after double-pass 2 cm LMA-8 fiber and single-pass pulse after dispersion compensation for 20 nJ, 100 fs input pulse: (a), (c), (e), (g) Output spectra after compensation of 0, -150, -300 and -450  $\text{fs}^2$  dispersion; (b), (d), (f), (h) pulses after single-pass compensation of corresponding dispersion.

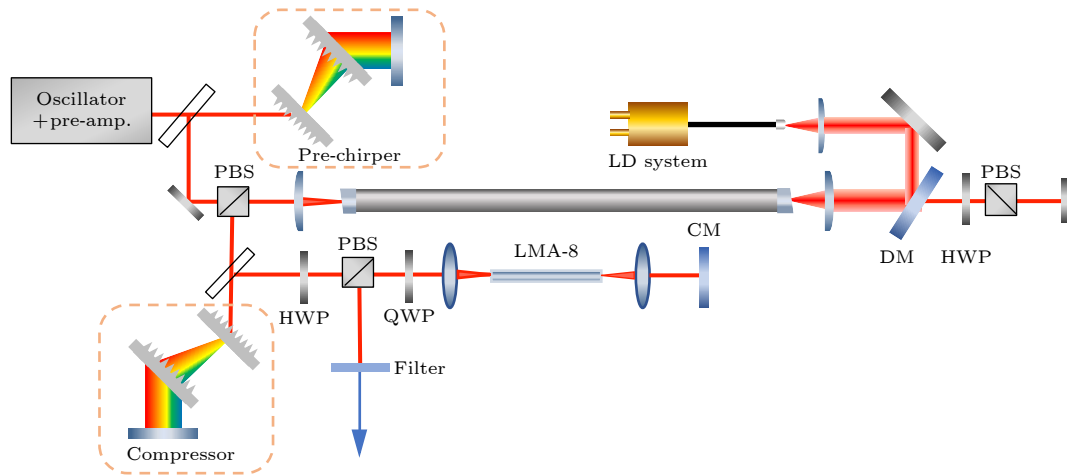


图 6 基于色散管理的双通 SESS 实验装置图 (其中 PBS, 偏振光束分束器; HWP, 半波片; QWP, 1/4 波片; CM, 啁啾镜; LD, 泵浦源; DM, 双色镜; Filter, 滤光片; 其余未说明器件均为平面反射镜)

Fig. 6. Dual-pass SESS experimental setup (PBS, polarizing beam splitter; HWP, half-wave plate; QWP, quarter-wave plate; CM, chirped mirror; LD, laser diode; DM, dichroic mirror; Filter, optical filter; other unspecified devices are plane reflectors).

频率为 44 MHz、平均功率为 8 mW 掺铒光纤振荡器. 经过一级预放大器、声光调制器和第二级预放大器后, 输出重频为 1 MHz、平均功率为 7 mW 的脉冲. 种子脉冲首先经过 1000 线/mm 的光栅对加

入一定的啁啾, 再耦合到主放大器中. 主放大器采用基于棒状光子晶体光纤的双通结构, 增益可高达 40 dB [27]. 放大后的脉冲经过第二个 1000 线/mm 的光栅对压缩后, 可以获得平均功率为 1 W 的脉冲,

其光谱如图 7(a) 所示, 光谱半高全宽大约是 25 nm, 自相关曲线如图 7(b) 所示, 脉冲宽度为 100 fs(高斯拟合), 接近变换极限脉冲. 压缩后的脉冲经过半波片和 PBS 控制输出能量, 通过选择焦距为 8 mm 的透镜耦合到 2 cm 长的 LMA-8 光纤中, 耦合效率大约为 70%. 通过透镜和啁啾镜 (单次反射补偿的二阶色散量  $-60 \text{ fs}^2$ , UltraFast Innovations) 或平面镜的组合, 将单通光原路返回耦合到 LMA-8 中, 耦合效率大约为 60%, 第二通经过 LMA-8 光纤后的圆偏振光再次经过  $1/4$  波片后, 转化为竖直线偏振光在 PBS 另一个端口导出, 获得展宽光谱. 之后利用合适的光学滤波器可以滤出最左侧或者最右侧的光谱旁瓣. 在实验中, 固定双通后输出脉冲能量 15 nJ, 同时优化两次耦合效率一致, 以确保恒定的脉冲能量, 因此光谱变化来自于补偿色散导致的脉冲形状和峰值功率的改变.

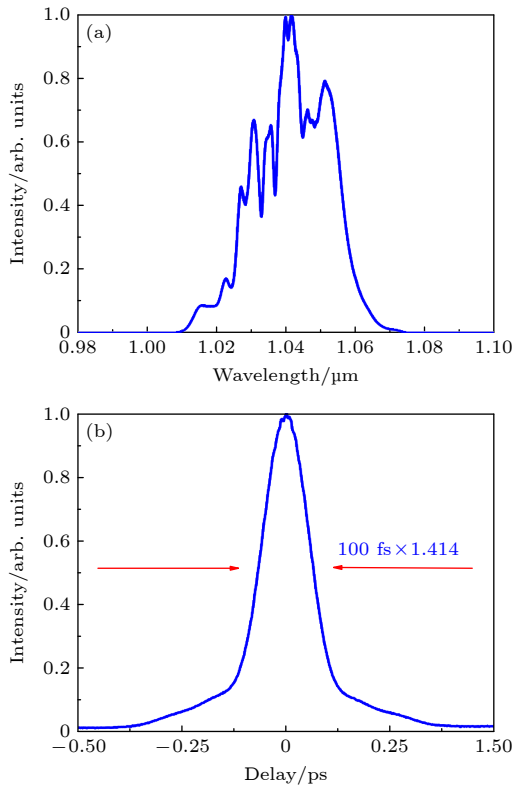


图 7 耦合进 LMA-8 光纤前的 (a) 光谱与 (b) 脉冲自相关曲线

Fig. 7. (a) Spectrum and (b) pulse autocorrelation curve before coupling into LMA-8 fiber.

图 8 展示了 100 fs 的输入脉冲在输出脉冲能量固定为 15 nJ 时, 经过 2 cm LMA-8 光纤补偿不同色散后双通末端产生的输出光谱. 当补偿二阶色散为  $0 \text{ fs}^2$  时, 光谱如图 8(a) 所示, 与输入光谱

(图 7(a)) 相比, 此时最左边和最右边旁瓣的峰值分别位于 1018 nm 和 1056 nm; 当增加二阶色散为  $-180 \text{ fs}^2$  时, 输出光谱如图 8(b) 所示, 输出光谱的左右旁瓣峰值波长都向两侧移动, 此时最左边和最右边旁瓣的峰值分别位于 950 nm 和 1164 nm. 图 8(c) 表示补偿二阶色散为  $-420 \text{ fs}^2$  时的输出光谱, 左侧光谱旁瓣峰值波长为 920 nm, 旁瓣较清晰, 长波部分光谱混乱, 与模拟结果图 5(c) 接近, 超越了光波分裂导致的展宽限制和色散引起的旁瓣不清晰极限; 如果进一步增加后续补偿色散量到  $-540 \text{ fs}^2$ , 光谱旁瓣消失, 光谱整体变得无序, 如图 8(d) 所示.

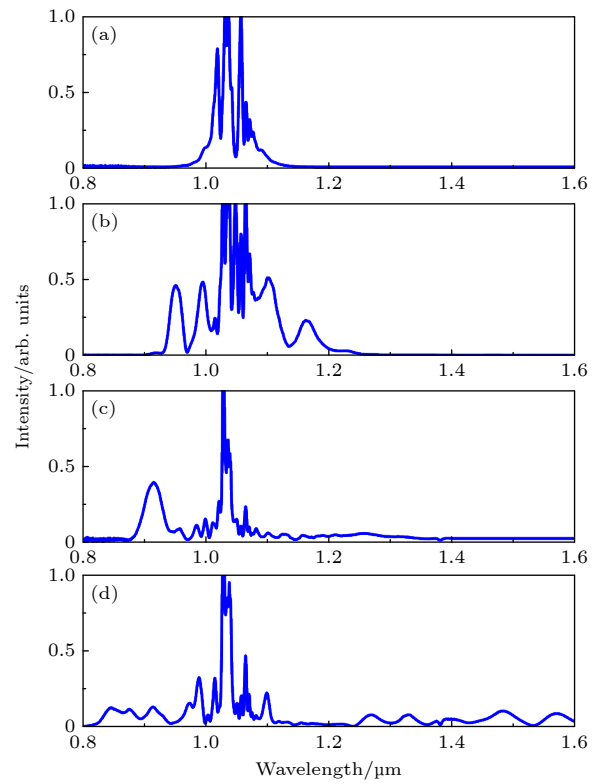


图 8 100 fs 输入脉冲在 2 cm LMA-8 光纤补偿不同色散量后双通产生的光谱 (此时固定输出脉冲能量 15 nJ) (a), (b), (c), (d) 补偿色散量依次为 0,  $-180$ ,  $-420$  和  $-540 \text{ fs}^2$

Fig. 8. Spectra generated by double pass of 100 fs input pulse in 2 cm LMA-8 fiber after compensating for different dispersion (the output pulse energy is fixed at 15 nJ): (a), (b), (c), (d) The corresponding compensation dispersion is 0,  $-180$ ,  $-420$  and  $-540 \text{ fs}^2$ , respectively.

更进一步, 研究如图 8(c) 所示情况下不同输出脉冲能量时的光谱演化情况, 确定固定补偿色散量后的最佳输出脉冲能量. 当输出脉冲能量为 5 nJ 时, 光谱如图 9(a) 所示, 光谱展宽量较小, 没有出现明显的光谱旁瓣. 当输出脉冲能量增加为

10 nJ 时, 光谱两侧出现光谱旁瓣, 此时最左边和最右边旁瓣的峰值分别位于 942 nm 和 1214 nm, 如图 9(b) 所示. 继续增加脉冲能量到 15 nJ 时, 输出光谱的左右旁瓣峰值波长都向两侧移动, 此时最左边旁瓣的峰值位于 920 nm, 长波部分光谱旁瓣逐渐消失, 如图 9(c) 所示. 当脉冲能量进一步增加到 20 nJ 时, 光谱旁瓣基本消失, 光谱变得杂乱无章, 如图 9(d) 所示.

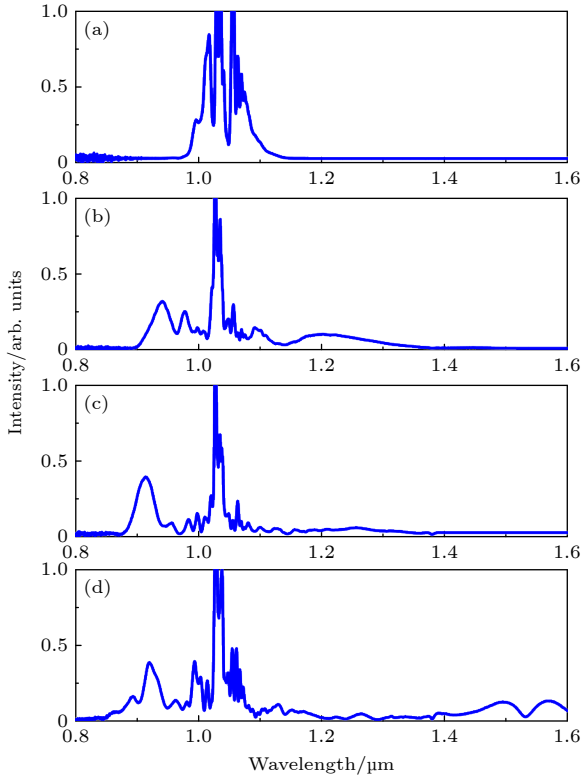


图 9 输入脉冲宽度为 100 fs、后置补偿 $-420 \text{ fs}^2$ 时, 不同输出脉冲能量下的输出光谱 (a) 5 nJ; (b) 10 nJ; (c) 15 nJ; (d) 20 nJ

Fig. 9. When the input pulse width is 100 fs and the post compensation is  $-420 \text{ fs}^2$ , the output spectra under different pulse energies: (a) 5 nJ; (b) 10 nJ; (c) 15 nJ; (d) 20 nJ.

将输出脉冲能量 15 nJ、后置补偿 $-420 \text{ fs}^2$ 的光谱左侧旁瓣滤出, 脉冲能量为 6 nJ, 占比总能量的 40%. 光谱如图 10(a) 所示, 其中心波长为 920 nm, 半高全宽为 30 nm, 对应的自相关曲线如图 10(b) 所示, 如果假定为高斯型脉冲, 那么脉冲宽度约为 113 fs. 图 10(b) 中的红色曲线为图 10(a) 中光谱所对应的变换极限脉冲, 其宽度为 44 fs. 由图 10(b) 可见, 滤出的 920 nm 脉冲的宽度远大于变换极限脉宽, 这是由于滤波片部分透过的长波成分对脉冲形状的影响以及测量过程中脉冲经过多个光学元

件造成的, 可以通过啁啾镜或者棱镜对将脉冲压缩至变换极限宽度.

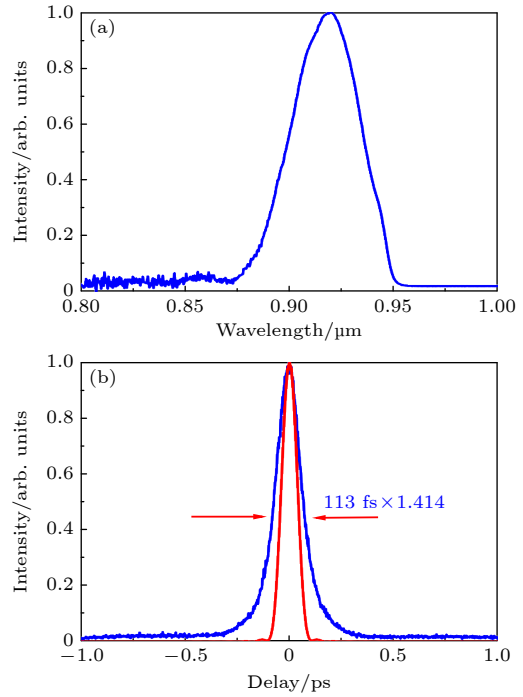


图 10 100 fs 输入脉冲双通 2 cm LMA-8 光纤后输出脉冲能量为 15 nJ 时, 利用光学滤波器滤出的最左侧光谱旁瓣和所对应的时域脉冲 (a) 滤出的光谱旁瓣; (b) 光谱旁瓣对应的脉冲自相关曲线 (蓝色) 以及变换极限脉冲的自相关曲线 (红色)

Fig. 10. When the 100 fs input pulse double passes 2 cm LMA-8 fiber with the fixed output pulse energy of 15 nJ, the leftmost spectral sidelobe and the corresponding time domain pulse filtered out by the optical filter: (a) The filtered spectral sidelobe; (b) the pulse autocorrelation curve (blue) corresponding to the spectral sidelobe and the autocorrelation curve (red) of the transform-limited pulse.

## 4 讨论部分

本实验利用了后置啁啾镜补偿色散来优化脉冲形状和增加脉冲峰值功率, 但是由于采用基于透镜的自由空间耦合, 导致脉冲在第二次通过光纤时存在 40% 的损耗. 在后续工作中, 可以选择具有合适色散量的单片啁啾镜, 将其紧贴在光纤的端面, 这样可以获得超过 90% 的耦合效率. 由于啁啾镜只能提供离散的色散量, 很难实验中获得系统所需要的最佳色散值, 考虑到所需的色散量在几百  $\text{fs}^2$ , 选择可以连续调节色散的棱镜对代替目前的啁啾镜来补偿色散, 有利于找到最佳色散量. 另外, 在实验中采用纤芯直径为 8  $\mu\text{m}$  的 LMA-8 光纤作为展宽介质, 获得了中心波长在 920 nm 处的 113 fs



脉冲, 脉冲能量为 6 nJ. 值得注意的是, 中心波长在 920 nm 的飞秒脉冲, 可通过双光子吸收激发绿色荧光蛋白, 因而可用于驱动双光子显微镜实现面向脑科学研究的无标记高速成像. 如果想要产生能量更高的 920 nm 飞秒脉冲, 可以选择更大纤芯的正色散光子晶体光纤.

近年来, 利用空芯光纤<sup>[28–30]</sup>或者多通腔<sup>[31–35]</sup>来展宽光谱再色散补偿成为压缩高功率、高能量飞秒脉冲的主要手段. 在近红外波段, 充有惰性气体的空芯光纤或多通腔具有正色散, 光谱展宽主要来自于脉冲传输过程中所经历的自相位调制效应, 展宽后的光谱含有典型的多个光谱旁瓣. 如果多通腔或者空芯光纤结合基于色散管理的双通 SESS 技术可以优化脉冲形状, 积累更多的非线性相位, 那么能够产生波长可大范围调谐的 mJ 量级飞秒脉冲.

## 5 结 论

本文提出一种基于色散管理的双通 SESS 技术. 理论和实验均表明, 该技术可以缓解传统 SESS 由于 OWB 效应导致的光谱展宽限制, 有效推迟 OWB 出现的位置, 大大拓展 SESS 脉冲的可调谐波长范围. 使用 2 cm LMA-8 光纤, 利用负色散啁啾镜改变单通后的脉冲形状和峰值功率, 从而调控脉冲在第二次通过 LMA-8 光纤时的非线性演化, 进而控制展宽后的光谱结构. 研究了相同脉冲能量与脉冲宽度条件下, 补偿不同色散的光谱输出情况, 发现当补偿 $-420\text{ fs}^2$ 时可以得到清晰且更宽的光谱旁瓣. 还研究了在相同脉冲宽度与补偿色散条件下, 不同输入脉冲能量对光谱展宽的影响. 在输入脉冲宽度为 100 fs、后置补偿 $-420\text{ fs}^2$ 色散、输出脉冲能量为 15 nJ 的条件下, 获得了脉冲能量为 6 nJ、旁瓣中心峰值在 920 nm、脉冲宽度为 113 fs 的脉冲. 我们相信, 如果用空芯光纤或者多通腔来替代目前的 LMA-8 光纤, 色散管理双通 SESS 技术将能产生 mJ 量级可调谐飞秒脉冲, 成为研究强场物理的有力工具.

## 参考文献

- [1] Stolen R H, Lin C 1978 *Phys. Rev. A* **17** 1448
- [2] Nakatsuka H, Grischkowsky D, Balant A C 1981 *Phys. Rev. Lett.* **47** 910
- [3] Tomlinson W J, Stolen R H, Shank C V 1984 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **1** 139
- [4] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P, Tomlinson W J 1983 *Opt. Lett.* **8** 289
- [5] Her T H, Raybon G, Headley C 2004 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16** 200
- [6] Lehnis R, Steinmetz A, Limpert J, Tünnermann A 2014 *Opt. Lett.* **39** 5806
- [7] Fu W, Wright L G, Wise F W 2017 *Optica* **4** 831
- [8] Buldt J, Müller M, Klas R, Eidam T, Limpert J, Tünnermann A 2017 *Opt. Lett.* **42** 3761
- [9] Närhi M, Fedotov A, Aksenova K, Fiebrandt J, Schönau T, Gerecke M, Gumenyuk R 2021 *Opt. Express* **29** 15699
- [10] Finot C, Fatome J 2010 *Opt. Express* **18** 18697
- [11] Lin C H, Gustafson T K 1972 *IEEE J. Quantum Electron.* **8** 429
- [12] Baudin K, Audo F, Finot C 2018 *Microwave. Opt. Technol. Lett.* **60** 882
- [13] Liu Y, Tu H, Boppart S A 2012 *Opt. Lett.* **37** 2172
- [14] Heidt A M, Hartung A, Bosman G W, Krok P, Rohwer E G, Schwoerer H, Bartelt H 2011 *Opt. Express* **19** 3775
- [15] Hooper L E, Mosley P J, Muir A C, Wadsworth W J, Knight J C 2011 *Opt. Express* **19** 4902
- [16] Liu W, Li C, Zhang Z, Kärtner F X, Chang G 2016 *Opt. Express* **24** 15328
- [17] Chung H Y, Liu W, Cao Q, Song L, Kärtner F X, Chang G 2018 *Opt. Express* **26** 3684
- [18] Hua Y, Zhou G, Liu W, Xin M, Kärtner F X, Chang G 2020 *Opt. Lett.* **45** 3410
- [19] Chung H Y, Liu W, Cao Q, Kärtner F X, Chang G 2017 *Opt. Express* **25** 15760
- [20] Chung H Y, Greinert R, Kärtner F X, Chang G 2019 *Biomed. Opt. Express* **10** 514
- [21] Chung H Y, Liu W, Cao Q, Greinert R, Kärtner F X, Chang G 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25** 6800708
- [22] Cheng Q d, Chung H Y, Schubert R, et al. 2020 *Commun. Biol.* **3** 569
- [23] Zhou G, Cao Q, Kärtner F X, Chang G 2018 *Opt. Lett.* **43** 2953
- [24] Wang J, Chen R, Chang G 2022 *Opt. Express* **30** 33664
- [25] Liu W, Li Z C, Chen R Z, Chang G Q 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 0208001 (in Chinese) [刘伟, 李中超, 陈润植, 常国庆 2023 *中国激光* **50** 0208001]
- [26] Liu W, Chia S H, Chung H Y, Greinert R, Kärtner F X, Chang G 2017 *Opt. Express* **25** 6822
- [27] Zhang Y, Wang J, Teng H, Fang S, Wang J, Chang G, Wei Z 2021 *Opt. Lett.* **46** 3115
- [28] Rothhardt J, Hädrich S, Klenke A, et al. 2014 *Opt. Lett.* **39** 5224
- [29] Nagy T, Hädrich S, Simon P, et al. 2019 *Optica* **6** 1423
- [30] Jenkins G W, Feng C, Bromage J 2022 *Opt. Lett.* **47** 1450
- [31] Kaunmann M, Pervak V, Kormin D, Leshchenko V, Kessel A, Ueffing M, Chen Y, Nubbemeyer T 2018 *Opt. Lett.* **43** 5877
- [32] Heyl C M, Seidel M, Escoto E, Schönberg A, Carlström S, Arisholm G, Lang T, Hartl I 2022 *Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO) San Jose, California, May 15–20, 2022 pSF4E.6*
- [33] Omar A, Ahmed S, Hoffmann M, Saraceno C J 2021 *Conference on Lasers Electro-Optics(CLEO) San Jose, California, May 9–14, 2021 pSTh2I.4*
- [34] Barbiero G, Wang H, Brons J, Chen B H, Pervak V, Fattahi H 2020 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **53** 125601
- [35] Balla P, Tünnermann H, Salman S H, Fan M, Mecejus M, Hartl I, Heyl C M 2022 *Conference on Lasers Electro-Optics(CLEO) San Jose, California, May 15–20, 2022 pSM3O.1*

# Dispersion management dual-pass self-phase modulation-enabled spectral selection<sup>\*</sup>

Wang Jing-Shang<sup>1)2)</sup> Wang Dong-Liang<sup>1)2)</sup> Chang Guo-Qing<sup>1)2)3)†</sup>

1) (*Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China*)

( Received 17 January 2023; revised manuscript received 27 February 2023 )

## Abstract

Self-phase modulation-enabled spectral selection (SESS) technology can generate wavelength-tunable femtosecond pulses, and it is expected to replace traditional complex optical parametric oscillators, and thus has attracted much attention. However, the positive dispersion in the fiber leads the modulation depth of the spectral lobes to decrease, while optical wave breaking hinders the spectral broadening. In order to solve the two problems, we propose a dual-pass SESS technology based on dispersion management which optimizes the shape of the front edge and rear edge of the pulse prior to the second pass by introducing negative dispersion, and compresses the pulse width for increasing the peak power of the pulse. The resulting spectrum features broader spectrum with a deeper modulation depth. By numerical simulation, we find that adjusting the value of the second-order dispersion compensated after the single pass, a broader spectral lobe can be obtained than both the single-pass case and the double-pass case without dispersion compensation. To verify our numerical simulation, we conduct experiments by using a 2-cm-long LMA-8 fiber for spectral broadening and several chirped mirrors to provide negative dispersion, which controls the nonlinear evolution of the pulse in the second pass of the LMA-8 fiber. We study the spectral output corresponding to different amounts of dispersion compensation and find that an optimal dispersion value is required to produce a clear and broader spectral lobe. We also investigate the effect of input pulse energy on spectral broadening under the same dispersion compensation conditions. With 15-nJ input pulse energy and  $-420 \text{ fs}^2$  dispersion compensation, the resulting SESS source delivers 6 nJ, 113-fs pulses with the peak wavelength at 920 nm.

**Keywords:** ultrafast fiber laser, self-phase modulation, frequency conversion

**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.-i

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230088

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFB3602602) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62175255, 62227822).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [guoqing.chang@iphy.ac.cn](mailto:guoqing.chang@iphy.ac.cn)