文章编号:1674-2869(2025)02-0210-08

商用光纤产生高能低噪声平坦可见光超连续谱的设计

杨超凡,邹 凡,金锐博,刘 阔,刘泽川,吴浩煜*
光学信息与模式识别湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘 要:可见光超连续谱(SC)是原子光频标系统的重要组成部分,直接用于多种光频标的计量、转换和传播。为满足稳定度达10^{-18}量级光频标的应用需求,本文基于数值迭代仿真算法,提出了一种商用光纤产生高能低噪声平坦可见光SC的有效设计。通过选取中心波长780 nm、脉宽200 fs以及峰值功率300 kW的线偏振脉冲激光泵浦长度15 cm的商用保偏光子晶体光纤(NL-PM-1050-NEG),充分利用受激拉曼散射与四波混频耦合作用导致SC噪声放大的增益饱和,有效抑制非相干的展宽贡献。获得的可见光SC光谱覆盖456~1 526 nm,平坦度为7 dB,光谱能量约为60 nJ,平均相干因子〈$|g_{12}|$〉和平均相对强度噪声〈N_{RIN}〉分别达到了1和0.11%。该可见光SC不仅具有媲美以往工作的高相位相干特性、低强度噪声以及可观的光谱平坦度,而且产生的光谱范围达到了3个倍频程,光谱能量提升了数倍以上。此外,所采用的光子晶体光纤为商用光纤,与自制光纤方案对比,节约了研发成本、减少了研发周期。

关键词:可见光超连续谱;商用光纤;高能量;低噪声;平坦度
中图分类号:TN248 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202403032

High-energy low-noise flat visible supercontinuum spectrum generation in commercial optical fibers

YANG Chaofan, *ZOU Fan*, *JIN Ruibo*, *LIU Kuo*, *LIU Zechuan*, *WU Haoyu**
Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China

Abstract: Visible supercontinuum spectrum (SC) is an important component of atomic optical frequency standards, and is directly used for measurement, conversion, and transmission of various optical frequencies. To meet the application requirements of optical frequency standards with stability at the 10^{-18} level, we proposed an effective design for high-energy, low-noise, flat visible SC generation using commercial optical fibers based on numerical iterative simulation algorithms. Selecting a polarization-maintaining photonic crystal fiber (NL-PM-1050-NEG) at 780 nm wavelength, 200 fs pulse width, 300 kW peak power, and 15 cm pump length, the gain saturation from stimulated Raman scattering and four-wave mixing coupling suppresses noise amplification, successfully inhibiting incoherent broadening. The resulted visible SC spans 456−1 526 nm, with a 7 dB flatness, an approximately 60 nJ spectral energy, and average coherence factor and relative intensity noise of 1 and 0.11%, respectively. This visible SC has high phase coherence, low intensity noise, and notable spectral flatness , covers a spectral range of three octaves, and has a spectral energy several times higher. Using a photonic crystal fiber commercially reduces costs and development time compared to custom-made fibers.

Keywords: visible supercontinuum spectrum; commercial optical fibers; high-energy; low-noise; flatness

收稿日期:2024-03-29
基金项目:国家自然科学基金(11904112,92365106,12074299);武汉工程大学科学研究基金(K202255);湖北省自然科学基金(2022CFA039)
作者简介:杨超凡,硕士研究生。Email: witycf97828@163.com
***通信作者**:吴浩煜,博士,特聘副教授。Email: haoyuwu@wit.edu.cn
引文格式:杨超凡,邹凡,金锐博,等. 商用光纤产生高能低噪声平坦可见光超连续谱的设计[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(2):210-217.

超连续谱（supercontinuum spectrum，SC）光源通常是指谱宽超过百纳米的相干激光，由高峰值功率的超短激光脉冲经高非线性介质中色散非线性传输而获得[1]。相较于传统的激光器，SC光源突破了激光工作介质的增益谱带宽限制，可以覆盖极宽的光谱范围，产生多个“稀有窗口”的谱线[2-4]。目前商业SC光源能够覆盖He-Ne激光器、氙灯、LED以及色心激光器等光谱范围，并且具有非常可观的功率密度，因此被广泛用于激光光谱学、大气环境检测、生物成像和高分子材料加工等应用领域[5-7]。高相干度SC光源谱宽跨度广，同时还具有谱线相位相干、谱线的线宽窄以及幅度噪声低等优势。在光与物质作用中，高相干度SC光源能够用于高信噪比的信号提取，从而有助于重要信息的测量、评估和分析[8-9]。基于此，高相干度SC光源在众多领域都有着广泛的需求。特别是近些年，在原子光频标和冷原子量子科学研究中，包括^{87}Sr（698 nm）、^{171}Yb（578 nm）、^{171}Yb^{+}（467 nm）以及^{40}Ca^{+}（729 nm）等多个重要原子的钟跃迁波长主要集中在可见光范围，由于缺乏合适高效的激光增益介质，高相干度可见光SC已成为重要的光源，直接用于多种不同光频标的计量、转换和传播[10-11]。

目前产生可见光SC的主流技术途径主要包括基于石英的高非线性光子晶体光纤[12]（photonic crystal fibers，PCF）、硅基光波导[13]以及二阶非线性晶体[14]等。其中高非线性PCF因具有宽带单横模传输优势，并且能够通过设计特殊的气孔结构有效管理色散、非线性参数，在实际应用中，能够满足对可见光SC的光谱调控需求，因此成为首选方案[15-17]。近年来，研究者们致力于优化设计PCF的气孔结构[18-19]或者利用拉锥光纤技术[20-21]，促使色散曲线更平坦、零色散波长（最小色散波长）趋于短波，从而使得超短脉冲激光能够工作在更合适的负色散区（全正色散区），直接产生更广带宽、高能量以及低噪声的可见光SC。然而，随着应用领域拓展和深入，当前多个原子光频标的稳定度已经达到10^{-18}量级[22-23]，而光频标的稳定度利用原子钟跃迁谱线与可见光SC拍频获取的探测信号进行评估，为了提升输出信噪比，对可见光SC的亮度、噪声特性及平坦度都提出了更高的要求。同时因为SC的产生机理复杂，其中负色散区的SC展宽主要基于孤子裂变和调制不稳定性；正色散区的SC则主要由自相位调制（self-phase modulation，SPM）和光波破裂（optical wave breaking，OWB）作用实现相干展宽，由受激拉曼散射（stimulated Raman scattering，SRS）和四波混频（four-wave mixing，FWM）作用获得非相干展宽[24]，因此全面提升SC性能是当前面临的重大挑战，高质量可见光SC产生的关键理论与技术问题依然是现阶段的研究重点。

基于此，本文通过使用780 nm飞秒超短脉冲激光泵浦不同色散特性的商用PCF，对产生高质量的可见光SC进行调控与优化设计。基于数值仿真技术，结合时频联合分布图、光谱一阶相干因子以及相对强度噪声分布结果，分别研究正负色散区可见光SC产生的时频演化行为、光谱强度分布和噪声放大特性，揭示商用PCF中飞秒脉冲色散非线性传输的动态物理机制。在此基础上，寻找最佳的系统结构与参数配置，发展一种商用光纤产生高能低噪声平坦可见光SC的有效设计方案，满足大多数原子频标和相关量子光学实验需求。

1　数值仿真模型

1.1　SC传输模型

为了对可见光SC进行光谱调控与设计，采用标量形式的广义非线性薛定谔方程（generalized nonlinear Schrödinger equation，GNLSE）进行仿真研究。该标量方程适用于泵浦脉冲为单一偏振以及使用保偏单模结构PCF的仿真条件，从而规避偏振效应的干扰[25]。GNLSE的表达形式如下[26]：

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z}+\frac{\alpha}{2}A(z,t)-\sum_{k\geqslant 2}\frac{\mathrm{i}^{k+1}}{k!}\beta_k\frac{\partial^k A(z,t)}{\partial t^k}=\mathrm{i}\gamma\left(1+\frac{\mathrm{i}}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial t}\right)\left\{A(z,t)\int_{-\infty}^{+\infty}R(t')\times\left|A(z,t-t')\right|^2\mathrm{d}t'\right\} \tag{1}$$

式（1）中：$A(z,t)$代表脉冲包络函数，z表示脉冲传输距离，t表示时间；等式左侧第二项和第三项构成线性项，分别对应脉冲沿光纤的传输损耗与色散效应；α为光纤损耗系数，因所采用光纤较短，所以该损耗可忽略；β_k表示在泵浦波长处的k阶色散量，仿真中考虑至10阶（$k=10$）的高阶色散效应；等式右侧为非线性项，主要包含SPM、自陡峭、SRS等非线性效应；非线性系数$\gamma=\omega_0 n_2/cA_{\mathrm{eff}}$，其中，$\omega_0$为中心波长角频率，光纤材料非线性折射率$n_2\approx 2.7\times10^{-20}$ m^2/W，c为真空中的光速，A_{eff}为光纤有效模场面积；非线性响应系数$R(t)=(1-f_{\mathrm{R}})\delta(t)+f_{\mathrm{R}}h_{\mathrm{R}}(t)$，其中$\left(1-f_{\mathrm{R}}\right)\delta(t)$为延时拉曼响应，$f_{\mathrm{R}}$为延时拉曼响应对非线性极化率的贡献，在

石英材料中$f_R \approx 0.18$，$h_R(t)$则表示延时拉曼响应函数，其时域表达式为[27]：

$$h_R(t) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1 \tau_2^2} \exp(-t/\tau_2)\sin(t/\tau_1) \quad (2)$$

式(2)中：延时拉曼响应函数的时间参数τ_1和τ_2分别取12.2和32.0 fs。

1.2 量子噪声模型

SC的理论研究中采用经典的每个模式一个光子(one-photon-per-mode，OPPM)量子噪声模型，即在每个模式频率成分上加入1个具有随机相位的光子。模型中量子噪声$\delta_{QN}(\omega) = \sqrt{h\omega/\mathrm{d}\omega}\exp(-\mathrm{i}\Phi(\omega))$，其中$\omega$为角频率，$h$为普朗克常数，$\Phi(\omega)$表示随机相位[28]。

加入量子噪声后，泵浦光脉冲的初始包络函数$A(0,t)$修正为：

$$A(0,t) = \sqrt{P_0}\,\mathrm{sech}(t/T_0) + F^{-1}\left(\delta_{QN}\right) \quad (3)$$

式(3)中：P_0和T_0分别代表泵浦脉冲的峰值功率和脉冲脉宽，F^{-1}则表示傅里叶逆变换到时域。

SC光源研究中，通常利用一阶相干因子$|g_{12}(\omega)|$评估SC相位相干性的优劣，$|g_{12}(\omega)|$的定义来自双缝干涉实验，具体形式为[28]：

$$|g_{12}(\omega)| = \left| \frac{\langle \tilde{A}_i^*(\omega)\tilde{A}_j(\omega)\rangle_{i\neq j}}{\sqrt{\langle|\tilde{A}_i(\omega)|^2\rangle\ \langle|\tilde{A}_j(\omega)|^2\rangle}} \right| \quad (4)$$

式(4)中：$\tilde{A}_i(\omega)$和$\tilde{A}_j(\omega)$分别表示两次在不同随机量子噪声下产生的SC的频域振幅，$\tilde{A}_i^*(\omega)$是$\tilde{A}_i(\omega)$的共轭形式；角括号表示对多轮模拟产生的SC求集合平均，为使模拟结果更符合真实情况，选择20轮仿真结果(即190对光谱)进行估算。

一阶相干因子$|g_{12}(\omega)|$取值处于0到1之间，取值越接近于1，产生的可见光SC的相位相干性越好，否则反之。同时，为了描述与光谱强度密度相关的相干特性，引入平均相干度$\langle|g_{12}|\rangle$进行评估，其表达形式为[25]：

$$\langle|g_{12}|\rangle = \frac{\int_0^{\infty}|g_{12}(\omega)|\ \langle|\tilde{A}(\omega)|^2\rangle\ \mathrm{d}\omega}{\int_0^{\infty}\langle|\tilde{A}(\omega)|^2\rangle\ \mathrm{d}\omega} \quad (5)$$

此外，SC相对强度噪声N_{RIN}以及在频谱范围内的平均相对强度噪声$\langle N_{RIN}\rangle$的表达形式分别如下[25]：

$$N_{RIN}(\omega) = \frac{\sqrt{\langle(|\tilde{A}(\omega)|^2 - \langle|\tilde{A}(\omega)|^2\rangle)^2\rangle}}{\langle|\tilde{A}(\omega)|^2\rangle} \quad (6)$$

$$\langle N_{RIN}\rangle = \frac{\int_0^E|N_{RIN}(\omega)|\ \langle|\tilde{A}(\omega)|^2\rangle\ \mathrm{d}\omega}{\int_0^E\langle|\tilde{A}(\omega)|^2\rangle\ \mathrm{d}\omega} \quad (7)$$

式(7)中：E表示−10 dB光谱强度的光频上限值。

2 SC优化设计与讨论分析

2.1 负色散区可见光SC设计

为满足大多数原子光频标及其相关的量子光学实验需求，产生的SC预期应能覆盖460~900 nm波长范围。因此，在负色散区产生高相干的可见光SC，应考虑选取零色散波长处于预期光谱范围中心处的PCF，如图1所示，商用型号NL-PM-750保偏PCF的截面相邻气孔的间距Λ=1.23 μm、气孔直径ϕ=0.69 μm，具有约750和1 280 nm的双零色散波长，能够满足产生可见光SC的需求。

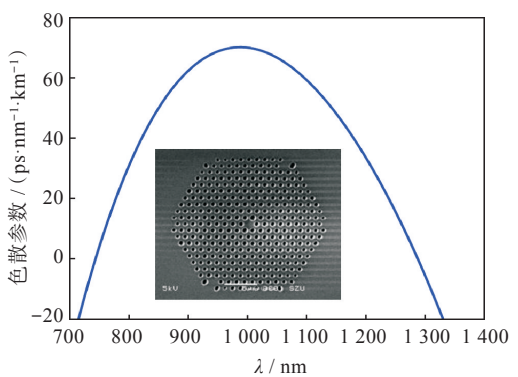


图1 NL-PM-750光纤色散参数曲线以及端面结构照片[29]

Fig. 1 The dispersion parameter curve and the end face structure photo for NL-PM-750 fibers[29]

负色散区SC设计中要严格控制脉冲孤子阶数(小于10)，从而降低由孤子裂变和调制不稳定性效应导致的影响[28]。为此，使用中心波长780 nm、脉宽50 fs以及峰值功率为8 kW的线偏振超短脉冲作为泵浦光，此时的非线性系数γ=0.095 $W^{-1}\cdot m^{-1}$，群速度色散值β_2=−0.006 9 ps^2/m，估算可得，对应的孤子阶数约为9.42，孤子裂变距离约为0.012 m[28]。为了降低孤子裂变发生次数，PCF长度采用0.1 m。

基于数值仿真技术，并考虑量子噪声模型，利用选取的泵浦脉冲注入商用负色散PCF，模拟仿真得到最终SC、一阶相干因子以及相对强度噪声结果如图2所示。产生的SC能量仅为0.4 nJ，−10 dB强度下SC覆盖530~1 086 nm，光谱不够平坦和光滑，在波长600~1 000 nm处存在大量的干涉调制结构。同时可见，SC一阶相干因子$|g_{12}|$在光谱范围内基本接近1，但在波长600~1 000 nm处出现了少量的毛刺结构，该毛刺与相对强度噪声分布的

调制尖峰一一对应，表明他们之间存在某种强相关特性，可能与相同波长范围内SC的光谱干涉调制结构有关。估算SC的平均相对强度噪声〈N_{RIN}〉为1.56%，此时强度噪声结果并不理想。由于产生的SC短波波长未达到预期值（460 nm蓝紫光波段），在优化设计过程中，尝试提升输入泵浦脉冲的峰值功率以实现SC的短波蓝移，但获得的可见光SC的光谱调制进一步加剧，相位相干性以及幅度噪声都发生了明显恶化。

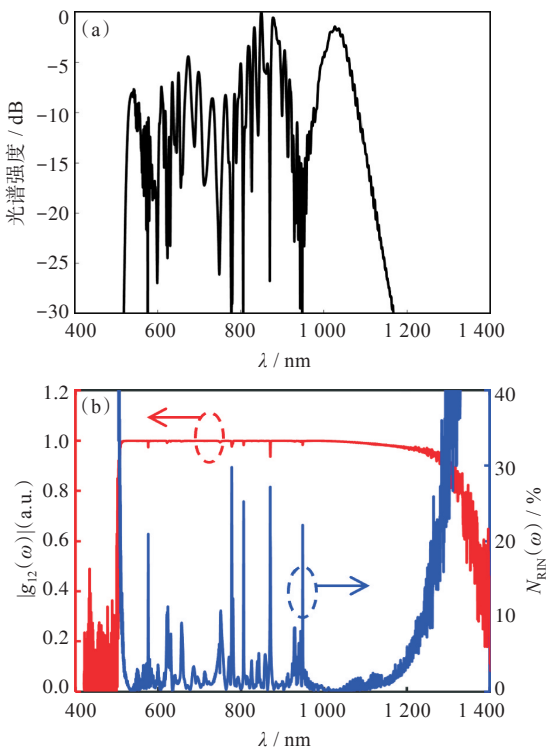


图2　NL-PM-750光纤输出端SC的光谱强度分布（a）及一阶相干因子和相对强度噪声分布（b）

Fig. 2　The spectral intensity distribution (a) and the modulus of the complex degree of first-order coherence and the relative intensity noise (b) of SC generation at the end of NL-PM-750 fibers

为了探究负色散PCF中可见光SC的光谱调控特性，厘清光谱中调制结构的成因，采用时频联合分布图进行分析与讨论。

不同传输距离下SC的时频联合分布结果如图3所示，其中在传输距离较短（0.5 cm）时，SC脉冲的演化主要受SPM效应和负色散的作用。脉冲受到孤子非线性压缩效应，表现在时域上发生脉宽压缩，对应频域上光谱强烈地非对称展宽，反映到时频联合分布图，呈现出光滑的类“S”型结构，这是由SPM效应导致的显著特征。随着超短脉冲继续传输（4.0 cm），受到高阶色散以及高阶非线性效应微扰，SC发生了孤子裂变，并按照峰值功率大小依次裂变成与主脉冲分离的基阶孤子以及尚未与主脉冲分离的孤子束，同时伴随着在零色散点另一侧的正色散区辐射出不同波长的色散波，该过程导致SC光谱高效地展宽到1个倍频程。此外，由不同色散效应导致不同波长分量的群速度不同，从时频联合分布图中可见，时延较小的孤子束与短波长SPM及色散波分量在时域上发生重叠，使得光谱在600 nm附近出现了大量干涉调制结构。当脉冲继续传输到光纤末端（10.0 cm），孤子束也会发生孤子裂变，持续产生多个基阶孤子和辐射不同波长的色散波，而已经裂变的基阶孤子在拉曼效应作用下还会发生红移，使得SC向长波长进一步拓展。此时新产生的不同波段光谱在正负色散区中的群速度不一致，使得最终的时频联合分布图呈现“抛物线”形状，对应的SC波长覆盖530~1 000 nm。此过程中在波长500~700 nm和800~1 000 nm附近出现了剧烈的调制结构，这是由不同波长的色散波与不同孤子以及SPM分量之间发生复杂相互作用所导致的干涉结果。

由此可见，负色散区SC的展宽主要基于孤子裂变，而裂变产生的基阶孤子、色散波与光谱中

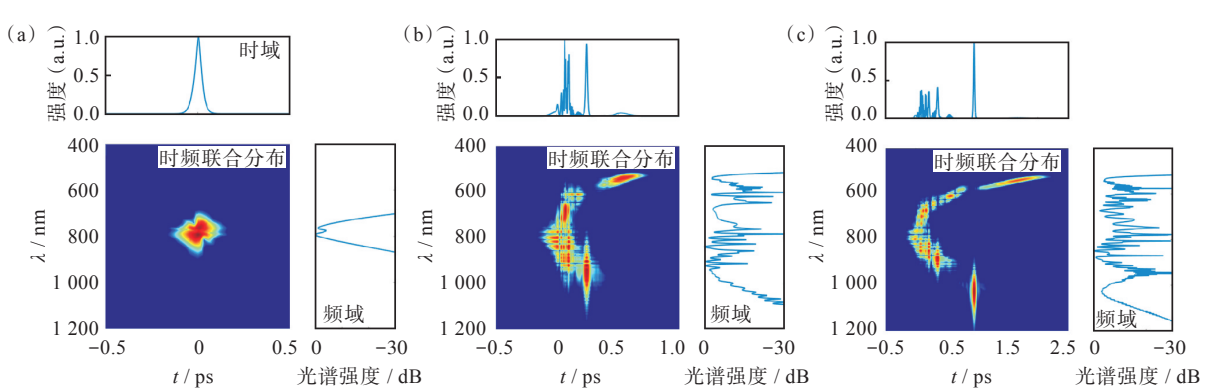


图3　在传输距离为0.5 cm（a）、4.0 cm（b）和10.0 cm（c）处产生的SC时频联合分布图

Fig. 3　Spectrograms of SC generation at a propagate distance of 0.5 cm (a), 4.0 cm (b), and 10.0 cm (c)

SPM分量都可能会发生干涉作用，导致光谱调制结构加剧，使得光谱不够平坦。同时，孤子裂变会导致光谱的相位噪声放大，使得相对强度噪声恶化。此外，负色散区产生的高相干可见光SC能量非常有限。过高的能量会提高孤子阶数，使得孤子裂变的次数增加，从而进一步导致光谱调制结构迅速加剧、光谱噪声放大。这些因素显然不利于实际研究应用。

2.2 正色散区可见光SC设计

正色散区可见光SC的相干展宽主要基于SPM和OWB，不受孤子裂变效应影响，能够实现平坦优异的光谱特性，为此，设计中选取长15 cm的商用型号NL-PM-1050-NEG保偏PCF。如图4所示，该光纤截面设计相邻气孔间距Λ=1.44 μm和气孔直径ϕ=0.39 μm，使PCF在全透过波段呈现正色散特性，且色散参数曲线在1 000 nm波段附近较为平坦。仍采用中心波长780 nm超短脉冲激光泵浦产生可见光SC，对应的非线性系数γ=0.044 $W^{-1}\cdot m^{-1}$，群速度色散值β_2=0.014 2 ps^2/m。

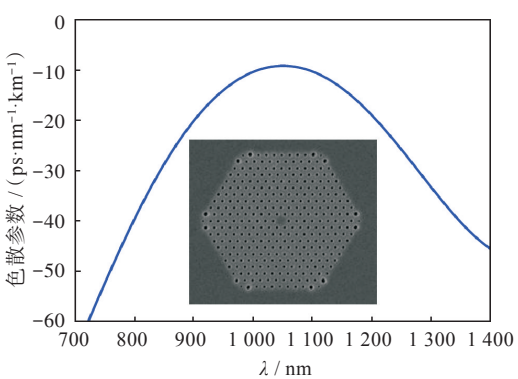


图4 NL-PM-1050-NEG光纤色散参数曲线以及端面结构照片[29]

Fig. 4 The dispersion parameter curve and the end face structure photo for NL-PM-1050-NEG fibers[29]

在正色散SC生成中，由于OWB引起的四波混频过程（产生SC光谱边缘分量）使光谱展宽的大小取决于OWB发生前SPM引起的光谱展宽量ω_{SPM}，因此，为了实现宽带的可见光SC，关键在于SPM引起的光谱展宽量ω_{SPM}。该类型光谱展宽通常在$L_{NL} \ll L_D$（L_{NL}代表非线性距离，L_D代表色散距离）时形成，因此可忽略色散效应进行估算[24]：

$$|\omega_{SPM}(z,t)-\omega_0|=\gamma P_0\frac{\partial A(t)}{\partial t}z \tag{8}$$

可见，增强输入脉冲峰值功率P_0来增宽ω_{SPM}，从而拓展两翼光谱带宽，最终可以实现宽带SC。同时，正色散区SC主要由SRS和FWM作用导致非相干展宽。在高峰值功率、超短脉冲泵浦条件下，利用SRS与FWM耦合导致SC噪声放大的增益饱和，能够有效抑制非相干的展宽贡献，进而促进高能量、高相位相干、低幅度噪声以及平坦光滑的宽带SC的实现[24]。综合考虑，最终确定泵浦脉冲的峰值功率为300 kW，而脉冲脉宽将在50~500 fs内进行选取。

为了证明正色散区SC的产生机制与负色散区SC的区别，首先选取中心波长780 nm、脉宽50 fs以及峰值功率300 kW的超短脉冲泵浦正色散PCF。不同传输距离下SC的时频联合分布结果如图5所示。可见，当超短脉冲沿着光纤传输至0.23 cm处，相较于图3(a)，由于此时泵浦峰值功率大幅提升，时频联合分布图呈现为更突出的“S”结构，脉冲同样受到典型的SPM效应作用，对应光谱均匀展宽且中心处出现明显的调制结构，该调制结构是时域波形中不同位置产生的同一光谱成分发生干涉的结果。随着脉冲传输距离增加至0.60 cm，由于不同波长受到的色散作用不同，脉冲后沿对应的短波传播速度快于脉冲中部SPM产生的蓝移波长分量，速度较快的后沿最终赶超速度较慢的中间部分，使脉冲后沿变陡，并发生光波破裂，具有不同瞬时频率的脉冲分量在时域上重叠产生干涉条纹，并通过FWM效应产生新的频率分量。由于PCF短波的色散曲线更加陡峭（图4），此时光波破裂在脉冲前沿尚未发生，具体表现在图5(b)中，脉冲后沿发生光波破裂，由SPM产生的600 nm附近的光谱分量与中心波长780 nm的脉冲后沿重叠，产生了487 nm左右新的波长成分，即光谱中心部分能量向短波转移。在剩余的传输过程中，脉冲前沿同样会出现光波破裂现象，产生了新的长波长光谱成分。光波破裂不断将能量从光谱中心转移至两翼。当脉冲传输到光纤末端15.00 cm时，图5(c)所示的时频联合分布结果呈现光滑结构，此时光波破裂作用将每个波长能量均匀分配至脉冲内独立位置，使得正色散区SC的时域波形和频域光谱都不会出现明显干涉结构，最终正色散区SC光滑和平坦特性远优于负色散区SC。

进一步的优化设计中，泵浦脉冲脉宽将在50~500 fs内进行选取，如表1所示。在300 kW高峰值功率泵浦下，增加泵浦脉冲脉宽，对应类“孤子阶数”的数值从27提升到275，产生的SC能量从15 nJ逐渐提高至150 nJ，SC光谱基本能够覆盖460~900 nm，但光谱宽度逐渐变小，光谱平坦度逐渐下降，在300~500 fs泵浦时，SC光谱在550和

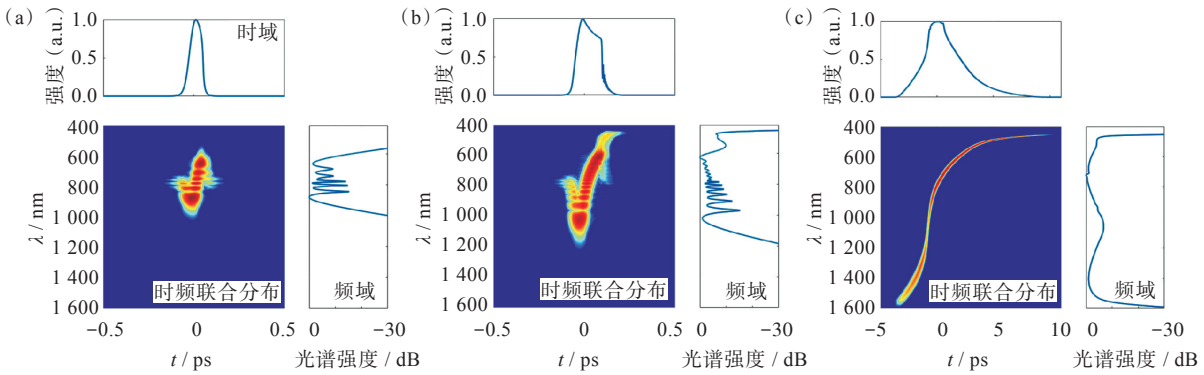


图5　在传输距离0.23 cm（a）、0.60 cm（b）和15.00 cm（c）处产生的SC时频联合分布图

Fig. 5　Spectrograms of SC generation at a propagate distance of 0.23 cm (a), 0.60 cm (b), and 15.00 cm (c)

650 nm波长附近的调制结构逐渐显著。尽管不同脉宽下产生的SC保持了优异的相位相干特性，即平均相干度〈$|g_{12}|$〉为1，但SC的幅度噪声特性发生了明显恶化，光谱范围内平均相对强度噪声〈N_{RIN}〉从0.08%升高至0.46%。

综合考察所设计的SC光谱范围、能量输出、光谱相位相干和强度噪声特性，以及考虑SC光谱的高平坦特性在光频标应用中能够大幅提高度量的准确性、降低功率均衡的难度，由表1可见，在峰值功率300 kW下，选取中心波长780 nm、脉宽200 fs以内的线偏振超短脉冲激光泵浦15 cm的NL-PM-1050-NEG保偏PCF，能够满足应用需求。其中，在中心波长780 nm、脉宽200 fs和峰值功率300 kW的脉冲泵浦下，产生的SC、一阶相干因子以及相对强度噪声结果如图6所示。此时SC光谱范围达到456~1 526 nm，能量达到了约60 nJ，光谱平坦度为7 dB，〈$|g_{12}|$〉为1，〈N_{RIN}〉为0.11%。

不同可见光SC的性能指标对比结果如表2所示。由表2可知，本文所设计的可见光SC不仅具有媲美以往工作的高相位相干特性、低强度噪声以及可观的光谱平坦度，而且产生的光谱范围最宽，达到了3个倍频程跨度，而光谱能量提升了数

表1　正色散区不同脉宽超短脉冲泵浦产生的SC相关性能指标

Tab. 1　Performance specifications related to the SC generated by ultrashort pulse pumping with different pulse durations in the normal dispersion regime

脉冲宽度 / fs	−10 dB 光谱范围 / nm	−10 dB 光谱宽度 / nm	光谱平坦度 / dB	〈$\|g_{12}\|$〉	〈N_{RIN}〉 / %	光谱能量 / nJ
50	459~1 560	1 101	6.7	1	0.08	15
100	457~1 538	1 081	7.2	1	0.11	30
200	456~1 526	1 070	7.0	1	0.11	60
300	456~1 515	1 059	10.0	1	0.15	90
400	457~1 496	1 039	18.0	1	0.25	120
500	461~1 408	947	21.0	1	0.46	150

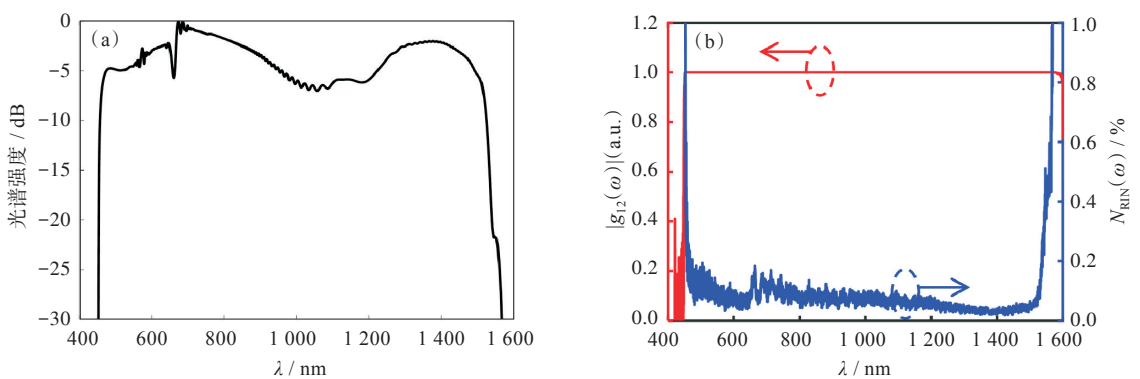


图6　NL-PM-1050-NEG光纤输出端SC的光谱强度分布（a）及一阶相干因子和相对强度噪声分布（b）

Fig. 6　The spectral intensity distribution (a), the modulus of the complex degree of first-order coherence and the relative intensity noise (b) of SC generation at the end of NL-PM-1050-NEG fibers

表2 不同可见光SC的性能指标对比

Tab. 2 Comparison of performance specifications of different visible SC

设计来源	光纤类型	−10 dB 光谱范围 / nm	−10 dB 光谱宽度 / nm	光谱平坦度 / dB	$\langle \lvert g_{12} \rvert \rangle$	$\langle N_{\mathrm{RIN}} \rangle$ / %	光谱能量 / nJ
文献[30]	自制光纤	450~850	400	4.0	1	<1	5
文献[31]	自制光纤	507~1 115	608	11.8	1	-	0.215
文献[32]	商用光纤	650~1 390	720	2.0	-	0.54	8.640
本文方案	商用光纤	456~1 526	1 070	7.0	1	0.11	60

倍以上。此外,因为所采用的PCF为商用光纤,与自制光纤方案对比,降低了研发成本,缩短了研发周期,使得SC在实用性及可行性方面更具优势。由此可见,这种高能、低噪声以及高平坦特性的可见光SC,非常适合不同的原子频标及相关的量子科学实验研究。

3 结 论

本文提出了一种商用光纤产生高能低噪声平坦性可见光SC的有效设计方案,为解决高精度原子光频标等领域面临的高质量可见光源短缺问题开辟了一条新途径。基于GNLSE建模,数值研究了不同色散特性的商用PCF中可见光SC生成的演化行为、光谱强度分布以及噪声特性。研究表明,负色散区SC展宽中,由孤子裂变产生的不同基阶孤子、色散波与光谱中SPM分量都可能会发生干涉作用,导致光谱不平坦、形成明显的调制结构,并最终使得SC噪声放大。而正色散PCF中,在高峰值功率超短脉冲泵浦下,虽然孤子阶数达到275(相较于负色散区,提升了接近200倍),但因为SC产生过程中非相干展宽机制被有效抑制,可见光SC具有更高能量、更高相位相干、低幅度噪声以及平坦光滑的特性。最终所设计的高性能可见光SC,不仅具有媲美以往工作的高相位相干特性、低强度噪声以及可观的光谱平坦度,而且产生的光谱范围覆盖456~1 526 nm,跨越3个倍频程,而光谱能量更是提升了数倍以上,高达60 nJ。此外,本文基于商用PCF方案,降低了研发成本、缩短了研发周期,使得SC在实用性及可行性方面具有明显的优势。

参考文献

[1] ALFANO R R. The supercontinuum laser source: fundamentals with updated references [M]. New York: Springer, 2006.

[2] LIU H H, YU Y, SONG W, et al. Recent development of flat supercontinuum generation in specialty optical fibers [J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(2): 180020.

[3] 杨未强, 宋锐, 韩凯, 等. 超连续谱激光光源研究进展 [J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 1−9.

[4] HONG L H, LIU L Q, LIU Y Y, et al. Intense ultraviolet-visible-infrared full-spectrum laser [J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1): 199.

[5] POUDEL C, KAMINSKI C F. Supercontinuum radiation in fluorescence microscopy and biomedical imaging applications [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(2): A139−A153.

[6] 陈志杰, 潘天宇, 徐源来, 等. 激光化学气相沉积法制备多层氧化铈缓冲层薄膜 [J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44(1): 42−47.

[7] 李博, 陈胜平, 李敬岁, 等. 线偏振超连续谱研究进展 [J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1719003.

[8] LIM H, JIANG Y, WANG Y M, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography with a fiber laser source at 1 μm [J]. Optics Letters, 2005, 30(10): 1171−1173.

[9] RUEHL A, MARTIN M J, COSSEL K C, et al. Ultrabroadband coherent supercontinuum frequency comb [J]. Physical Review A, 2011, 84(1): 011806.

[10] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks [J]. Reviews of Modern Physics, 2015, 87(2): 637−701.

[11] DAI S Y, ZHENG F S, LIU K, et al. Cold atom clocks and their applications in precision measurements [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(1): 013701.

[12] 黎玥, 董克攻, 李峰云, 等. 长锥区光子晶体光纤实现300 W高功率可见光超连续谱输出 [J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(2): 021002.

[13] FANG Y X, BAO C J, LI S A, et al. Recent progress of supercontinuum generation in nanophotonic waveguides [J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(1): 2200205.

[14] DE LA CADENA A, PARK J, TEHRANI K F, et al. Simultaneous label-free autofluorescence multi-harmonic microscopy driven by the supercontinuum

generated from a bulk nonlinear crystal [J]. Biomedical Optics Express, 2024, 15(2): 491-505.
[15] RANKA J K, WINDELER R S, STENTZ A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. Optics Letters, 2000, 25(1): 25-27.
[16] FANG X H, HU M L, HUANG L L, et al. Multiwatt octave-spanning supercontinuum generation in multicore photonic-crystal fiber [J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2292-2294.
[17] 余海湖，吴建文，马悦，等. 高非线性光子晶体光纤中可见光至近红外超连续谱的产生 [J]. 光子学报，2022, 51(9): 0906001.
[18] ZHANG H Y, LI Y, YAN D L, et al. All-fiber high power supercontinuum generation by cascaded photonic crystal fibers ranging from 370 nm to 2 400 nm [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 7101608.
[19] PRINCE M T M, ALAM M S. Comprehensive analysis of dual core photonic crystal fibers for optimizing optical properties towards highly coherent supercontinuum generation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(17): 5703-5713.
[20] ZHANG H Y, LI F Y, LIAO R Y, et al. Supercontinuum generation of 314.7 W ranging from 390 to 2 400 nm by tapered photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1429-1432.
[21] SØRENSEN S T, LARSEN C, JAKOBSEN C, et al. Single-mode pumped high air-fill fraction photonic crystal fiber taper for high-power deep-blue supercontinuum sources [J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 1097-1100.
[22] HUNTEMANN N, SANNER C, LIPPHARDT B, et al. Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 063001.
[23] 黄垚，管桦，高克林. 不确定度和稳定度达10^{-18}量级的钙离子光频标 [J]. 计测技术，2023, 43(3): 116-128.
[24] HEIDT A M, FEEHAN J S, PRICE J H V, et al. Limits of coherent supercontinuum generation in normal dispersion fibers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(4): 764-775.
[25] GONZALO I B, ENGELSHOLM R D, SØRENSEN M P, et al. Polarization noise places severe constraints on coherence of all-normal dispersion femtosecond supercontinuum generation [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 6579.
[26] DUDLEY J M, COEN S. Coherence properties of supercontinuum spectra generated in photonic crystal and tapered optical fibers [J]. Optics Letters, 2002, 27(13): 1180-1182.
[27] BLOW K J, WOOD D. Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(12): 2665-2673.
[28] DUDLEY J M, GENTY G, COEN S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1135-1184.
[29] 刘双龙. 宽带相干反斯托克斯拉曼散射光谱探测和显微成像研究 [D]. 深圳：深圳大学，2019.
[30] HEIDT A M, HARTUNG A, BOSMAN G W, et al. Coherent octave spanning near-infrared and visible supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3775-3787.
[31] RAVI A, BECK M, PHILLIPS D F, et al. Visible-spanning flat supercontinuum for astronomical applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(22): 5309-5315.
[32] GENIER E, GRELET S, ENGELSHOLM R D, et al. Ultra-flat, low-noise, and linearly polarized fiber supercontinuum source covering 670-1 390 nm [J]. Optics Letters, 2021, 46(8): 1820-1823.

本文编辑：霍淑利