

椭圆空芯正常色散保偏光纤的数值研究

李洪伟, 王春灿, 李婧, 王鹏, 李培鑫, 杜志勇

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京

Email: chcwang@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2021年3月17日; 录用日期: 2021年6月23日; 发布日期: 2021年6月30日

摘要

在高掺锗纤芯中引入椭圆空气孔可以为两个正交的偏振基模提供高双折射, 通过优化光纤结构参数, 在 1000 nm 到 3000 nm 波长范围内得到了低且平坦的色散曲线, 非线性系数高达 0.01 ps/nm km, 双折射高达 10^{-3} 量级。数值结果表明, 峰值功率为 150 kW, 中心波长为 1920 nm, 宽度 0.1 ps 的泵浦脉冲分别沿慢轴和快轴偏振方向耦合到长度为 0.5 m 的光纤中, 输出光谱都可以在 -20 dB 处覆盖一个倍频(波长范围是 900~2500 nm), 同时, 输出脉冲在整个波长范围内具有极好的相干性。

关键词

重掺锗, 超连续光谱, 偏振基模, 高双折射

Numerical Research on the Elliptical-Air-Hole Polarization-Maintaining Fiber with All Normal Dispersion

Hongwei Li, Chuncan Wang, Jing Li, Peng Wang, Peixin Li, Zhiyong Du

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing

Email: chcwang@bjtu.edu.cn

Received: Mar. 17th, 2021; accepted: Jun. 23rd, 2021; published: Jun. 30th, 2021

Abstract

The heavily Ge-doped silica fiber with the elliptical air hole in the core can offer high birefringence

文章引用: 李洪伟, 王春灿, 李婧, 王鹏, 李培鑫, 杜志勇. 椭圆空芯正常色散保偏光纤的数值研究[J]. 光电子, 2021, 11(2): 79-88. DOI: 10.12677/oe.2021.112010

for the two orthogonal polarized fundamental modes. The nonlinear parameter up to $0.01 \text{ W}^{-1}/\text{m}$ can be obtained by optimizing the structure parameters, while the birefringence value can reach up to the order of 10^{-3} . The numerical results indicate that when the 1920 nm 0.1 ps pump pulse with the 150 kW peak power is coupled into the 0.5 m fiber and polarized along the slow- and fast axes, the output spectra can cover over one octave in the wavelength range of around $900\sim 2500 \text{ nm}$ at -20 dB . At the same time, the output pulse has excellent coherence in the whole wavelength range.

Keywords

Heavily Ge-Doped, Supercontinuum Generation, Polarized Fundamental Modes, High Birefringence

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超连续光谱(Supercontinuum generation, SC)的产生是指耦合到光纤中的脉冲光,在色散和非线性效应共同作用下光谱获得极大的展宽。由于超连续光谱在光学相干层析成像[1]、生物医学[2]、生物光子学[3]和光谱学[4]中的广泛应用而备受关注。与反常色散光纤相比,基于全正常色散光纤生成超连续谱具有高相关性的优势。用于产生超连续光谱的全正常色散光纤主要有空气-石英光子晶体光纤[5]、全固态软玻璃光子晶体光纤[6]、碲酸盐玻璃光子晶体光纤[7]、硫属化物玻璃光子晶体光纤[8]、填充高非线性液体的空芯光纤[9] [10] [11] [12]和重掺锗石英光纤[13] [14] [15] [16] [17]等。此外,为了进一步抑制由光纤中随机偏振模式之间的耦合引起的偏振不稳定性,保偏(Polarization Maintaining, PM)全正常色散光纤可以用于产生具有线性偏振特性的超连续光谱。例如,在包层中引入应力区的空气-石英光子晶体光纤[18] [19] [20]和全固态软玻璃光子晶体光纤[21],以及具有不对称排列的硫系玻璃光子晶体光纤[22]。

本文针对近红外波段,提出一种石英保偏光纤用于生成线偏振超连续光谱,具体是在高掺锗纤芯中引入一个椭圆空气微孔以获得高双折射。文章第二部分介绍了光纤结构和理论模型,并讨论了光纤的参数变化对色散曲线的影响,同时给出了光纤的非线性参数、双折射和损耗等特性。第三部分通过数值仿真计算研究了基于保偏光纤的SC产生。

2. 理论模型及光纤结构特性分析

2.1. 光纤结构设计

如图1(a)所示,掺锗石英的零色散波长(ZDW)随着掺锗浓度的增加向长波长方向移动。当 $X = 100 \text{ mol}\%$ (青色曲线)时,对应的ZDW为 1730 nm ,其位于距离纯石英的ZDW的 470 nm 处(蓝色曲线)。另外,在图1(b)中可以看出,在 1000 nm 至 3000 nm 的波长范围内,掺锗石英和纯石英之间的折射率差可以达到 0.14 ,这为获得高数值孔径光纤提供了基础条件。图2显示了保偏光纤的横截面结构,在纤芯中引入一个椭圆空气孔以获得双折射,将椭圆短轴的方向定义为 x 轴,垂直于 x 轴的方向定义为 y 轴。光纤的群速度色散可以通过调整 d_1 、 d_2 、 d_c 和 X 的值来实现。

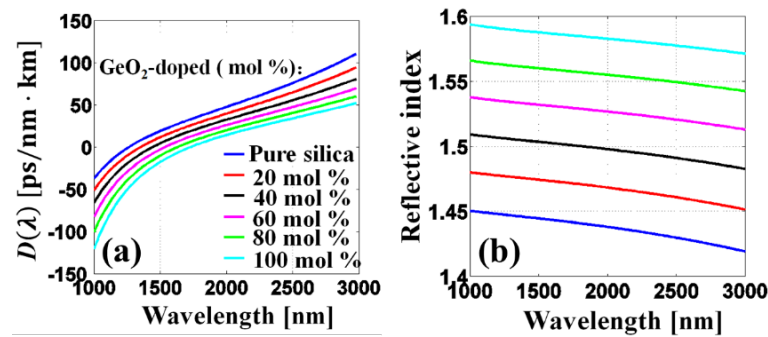


Figure 1. The curves of material dispersions (a) and refractive indices (b) for pure silica and GeO_2 -doped silica with different germanium concentrations

图 1. 纯石英和掺锗石英的材料色散曲线(a)和折射率曲线(b)

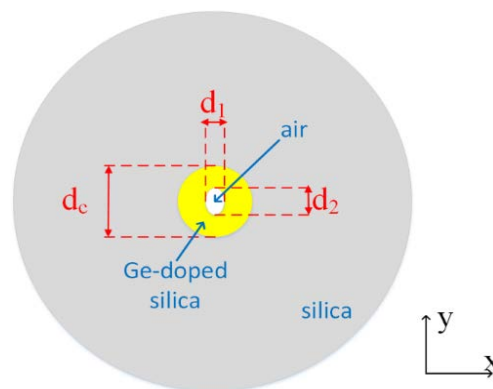


Figure 2. The cross-section of the polarization-maintaining (PM) fiber. The cladding is pure quartz (gray), the core (yellow) area with a diameter of d_c is doped with germanium dioxide (GeO_2), the doping concentration is set to X , the short axis is d_1 , and the elliptical air hole with the long axis d_2 is located in the center core

图 2. 保偏光纤的横截面。包层为纯石英(灰色), 直径为 d_c 的纤芯(黄色)区域掺杂二氧化锗(GeO_2), 掺杂浓度设为 X , 短轴为 d_1 , 长轴为 d_2 的椭圆空气孔位于纤芯中心

参数 n_A 和 n_B 代表掺杂 GeO_2 的石英和纯石英的折射率[23], 由下式给出

$$n_{A, \text{or } B}^2(\lambda) - 1 = \sum_1^3 \frac{[SA_i + X(GA_i - SA_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [SI_i + X(GI_i - SI_i)]^2} \quad (1)$$

其中 SA_i 、 SI_i 、 GA_i 和 GI_i ($i = 1, 2, 3$) 是纯石英和掺 GeO_2 的石英玻璃的塞尔迈耶系数。 λ 是真空中波长, X 是二氧化锗的摩尔浓度, 单位为 mol%。当 $X = 0$ 时, 公式(1)中的折射率为 n_B 。光纤的群速度色散用 $D(\lambda)$ 表征, 可以表示成:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (2)$$

其中 c 是真空中光速, n_{eff} 是工作波长处基模的有效折射率, 可以通过软件 Comsol 求解矢量波动方程得到。非线性参数 $\gamma(\lambda)$ 定义为:

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} n_2(x, y) |F(x, y)|^4 dx dy}{\left(\int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right)^2} \quad (3)$$

其中 $n_2(x, y)$ 是非线性折射率, $F(x, y)$ 是光纤模式的模式强度分布。掺锗石英和纯石英材料的非线性折射率 n_2 由公式 $(2.16 + 0.033X)$ 给出, 单位为 $10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ [24]。双折射参数 B 定义为:

$$B = \left| n_{eff}^x - n_{eff}^y \right| \quad (4)$$

其中 n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别是 x 偏振和 y 偏振基模的有效折射率。模式的总损耗 L_{total} 包括光纤中的限制损耗 L_c 和吸收损耗 L_A , 其可由下式表示:

$$L_c(\lambda) = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) \quad (5)$$

$$L_A = \Gamma^{core}(\lambda) \times \alpha_{\text{GeO}_2} + \Gamma^{cladding}(\lambda) \times \alpha_{\text{SiO}_2} \quad (6)$$

其中 $\text{Im}(n_{eff})$ 表示模式有效折射率的虚部。参数 $\Gamma^{core}(\lambda)$ 和 $\Gamma^{cladding}(\lambda)$ 分别是掺杂 GeO_2 的纤芯和纯石英包层中的光功率占比。 α_{GeO_2} 和 α_{SiO_2} 分别 $L_A = \Gamma^{core}(\lambda) \times \alpha_{\text{GeO}_2} + \Gamma^{cladding}(\lambda) \times \alpha_{\text{SiO}_2}$ 代表掺锗石英和纯石英的吸收损耗 [25]。

2.2. 保偏光纤的结构特性

如图 3(a) 所示, 通过对比光纤引入椭圆空气孔前后的群速度色散发现, 保偏光纤中的 x 偏振和 y 偏振基模在正常色散区域具有较低且平坦的群速度色散分布, 在工作波长 1920 nm 附近, x 偏振和 y 偏振基模的群速度色散值分别为 $-18 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 和 $-11 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 。如图 3(b) 所示, x 偏振基模的群速度高于 y 偏振基模的群速度, 所以 x 和 y 偏振方向分别对应于保偏光纤中的快轴(fast axis)和慢轴(slow axis)。

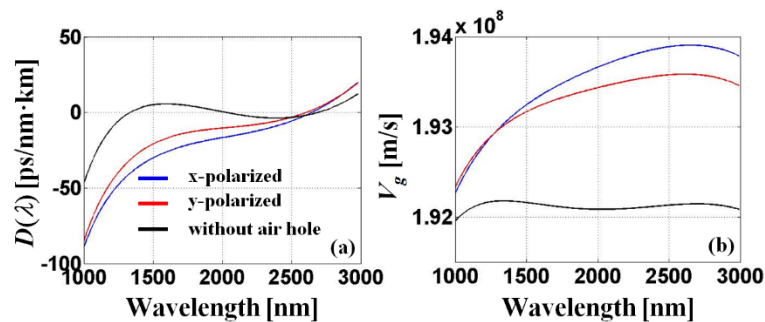


Figure 3. The profiles of the group velocity dispersion (GVD) (a) and group velocity (GV) (b) for the x - and y -polarized fundamental modes in the PM fiber, where $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$. The black curve represents the GVD and GV curve of the fiber without air holes in the core, where $d_c = 2.8 \mu\text{m}$

图 3. 保偏光纤中 x 和 y 偏振基模的群速度色散(GVD)(a)和群速度(GV) (b) 随波长变化曲线图, 其中 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$ 。黑色曲线代表纤芯中没有引入空气孔的光纤 GVD 和 GV 曲线图, 其中 $d_c = 2.8 \mu\text{m}$

首先, 椭圆空气孔对光纤群速度色散曲线的影响如图 4 所示, 随着 d_1 值的减小, 光纤的群速度色散逐渐减小, 同时在 1920 nm 附近变得更加平坦, 例如, 在 d_2 等于 $0.8 \mu\text{m}$ 的条件下, 相比于 d_1 等于 $0.6 \mu\text{m}$ (粉色曲线) 的情况, d_1 等于 $0.4 \mu\text{m}$ (青色曲线) 时 x 偏振(y 偏振)基模的色散从 -100 (-92) $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 降低到 -79 (-61) $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 。当 d_1 值保持不变, 而 d_2 值减小时, 光纤的 x 和 y 偏振基模的群速度色散分布都减小, 例如, 当 d_1 保持为 $0.2 \mu\text{m}$ 时, 相比于 d_2 等于 $0.6 \mu\text{m}$ (蓝色曲线) 的情况, d_2 等于 $0.4 \mu\text{m}$ (红色曲线) 时 x 偏振(y 偏振)基模的色散从 -33 (-18) $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 降低到 -18 (-11) $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 。

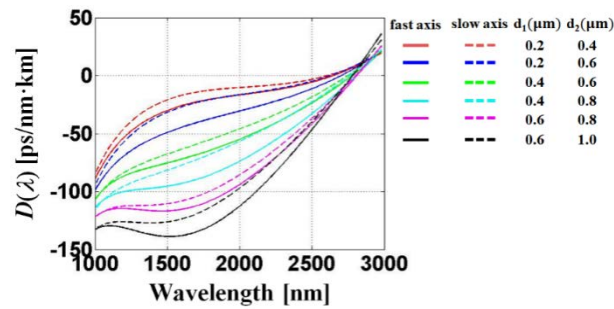


Figure 4. The profiles of the group velocity dispersion with the wavelength of the fundamental mode when the d_1 and d_2 values of the elliptical air hole change, where $d_c = 2.8 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$

图 4. 当保偏光纤椭圆空气孔的 d_1 和 d_2 值变化时基模的群速度色散随波长变化曲线图。其中, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$

其次, 图 5(a)显示了掺锗浓度对光纤色散特性的影响。对于给定光纤芯径 d_c 和椭圆空气孔大小的保偏光纤, 当 GeO_2 掺杂浓度为 40 或 60 mol% 时, x 偏振和 y 偏振基模在 1000 nm 至 3000 nm 的波长范围内均表现出全正常的群速度色散分布。然而, X 等于 60 mol% (红色) 的情况是所期望的用于 SC 产生的群速度色散分布, 因为它具有低且平坦的群速度色散分布。因此, 在下面的讨论中, X 的值取为 60 mol%。此外, 图 5(b) 中示出了光纤芯径 d_c 为不同值时的群速度色散曲线。当 d_c 从 $2.4 \mu\text{m}$ 增加到 $3.0 \mu\text{m}$ 时, $x(y)$ 偏振基模在 1920 nm 处的群速度色散值分别从 -52 (-45) 增加到 -6 (1) ps/nm km。此外, 光纤的单模传输条件可由下式计算:

$$V = \frac{2a\pi}{\lambda_c} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2} \quad (7)$$

其中, 归一化频率 $V \leq 2.4048$ 时, 光纤可以保持单模传输, n_{core} 和 n_{cladding} 分别代表光纤纤芯和包层的折射率, a 是纤芯半径, λ_c 是光纤的工作波长。经计算, 当 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$ 时, 光纤芯径 $d_c = 2a$ 应小于 $3.0 \mu\text{m}$ 。由于本文研究主要集中在单模光纤在正常色散区域的 SC 产生, 因此, 在下面的讨论中, 保偏光纤的参数设定为 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$ 和 $X = 60 \text{ mol}\%$, 其在 1000 nm 到 2500 nm 波长范围内具有宽且平坦的全正常群速度色散分布。

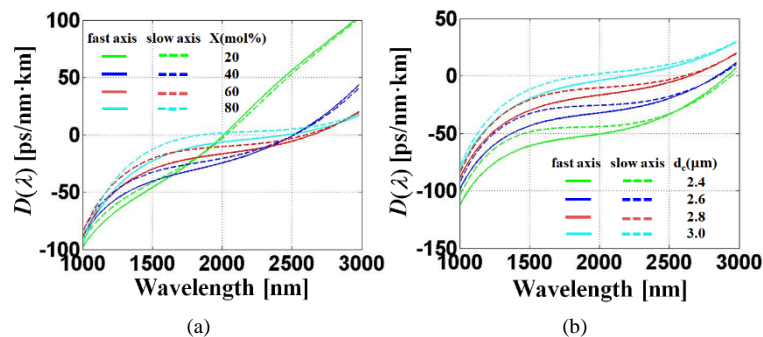


Figure 5. The profiles of the group velocity dispersion for the x - and y -polarized fundamental modes in the PM fiber: (a) GeO_2 concentration X changes, but other parameters remain unchanged, where $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$; (b) The d_c value of the core diameter changes, but other parameters remain unchanged, where $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$

图 5. 保偏光纤基模的群速度色散曲线图: (a) GeO_2 掺杂浓度 X 值变化, 其他参数不变。其中, $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$; (b) 纤芯芯径 d_c 值变化, 其他参数不变。其中, $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$

如图 6(a)所示, 当波长较短时, 保偏光纤中的光纤模式被束缚在空气孔内, x 偏振方向(快轴)的模场更多地分布在空气孔外面, 而 y 偏振方向(慢轴)的模场分布集中在空气孔内, 双折射逐渐增加。波长继续增加, 模场分布已经大部分集中在空气孔外, 两个偏振方向的有效折射率差逐渐减小。因此, 在 1000 nm 到 3000 nm 的波长范围内, 保偏光纤的双折射先增加后减小, 在 1900 nm 附近达到最大值, 此时双折射高达 1.4×10^{-3} 。如图 6(d)所示, 在从 1000 nm 到 3000 nm 的整个波长范围内, 保偏光纤的总损耗远低于 0.01 dB/cm。此外, 如图 6(b)所示, 在全部波长范围内, 两个正交偏振基模的具有几乎相同的非线性参数和有效模式面积分布, 1920 nm 波长处的 γ 值高于 $0.01 \text{ W}^{-1}/\text{m}$, 这有助于缩短用于产生 SC 的光纤长度。

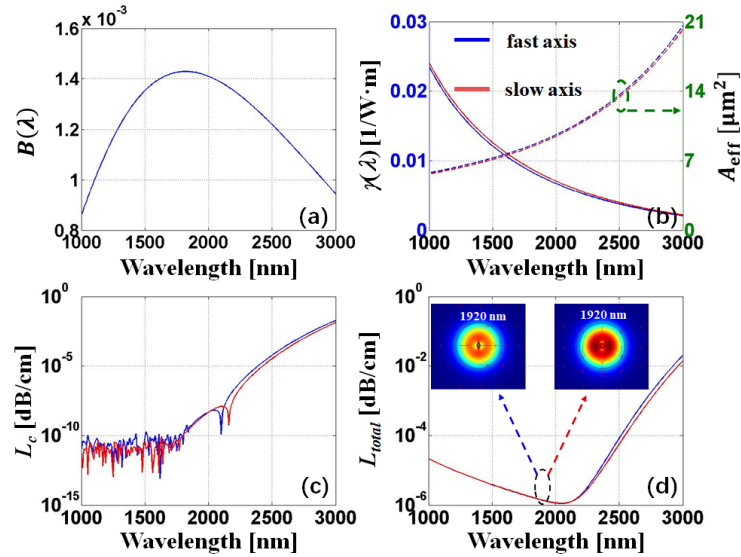


Figure 6. The curves of birefringence $B(\lambda)$ (a), the nonlinear parameter $\gamma(\lambda)$ (left) with effective mode area A_{eff} (right) (b), the confinement loss L_c (c) and total loss L_{total} (d) of the fundamental modes in the PM fiber, where $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$

图 6. 保偏光纤基模的双折射 $B(\lambda)$ (a), 非线性参数 $\gamma(\lambda)$ (左)与有效模式面积 A_{eff} (右) (b), 限制损耗 L_c (c)和总损耗 L_{total} (d), 其中 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 2.8 \mu\text{m}$, $X = 60 \text{ mol}\%$

3. 保偏光纤中超连续光谱的产生

通过在频域求解非线性薛定谔方程(NLSE) [26] [27], 研究了入射光脉冲沿着所提出的保偏光纤的传播。峰值功率对输出脉冲的影响如图 7 所示, 脉冲宽度和光纤长度分别设置为 0.1 ps 和 0.3 m。同时, 从图 7(a)和图 7(c)中可以发现, 两个偏振方向的输出脉冲存在走离, 因为光纤的长度是大于光纤走离长度的。如图 7(b)和图 7(c)所示, 当峰值功率从 50 kW 增加到 150 kW 时, 两个偏振方向的频谱明显展宽。但是, 相比 x 偏振方向, y 偏振方向的输出脉冲展宽更大一些, 这是由于 y 偏振方向上的色散比 x 偏振方向小导致的。因此, 在下面的讨论中, 我们选择 y 偏振方向(慢轴)进行超连续光谱生成的研究。数值模拟中的输入光脉冲由下式描述

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right) \quad (8)$$

其中, $T_0 = T_{\text{FWHM}}/\sqrt{2\ln 2}$, T_{FWHM} 是脉冲的半峰全宽; P_0 是脉冲峰值功率。

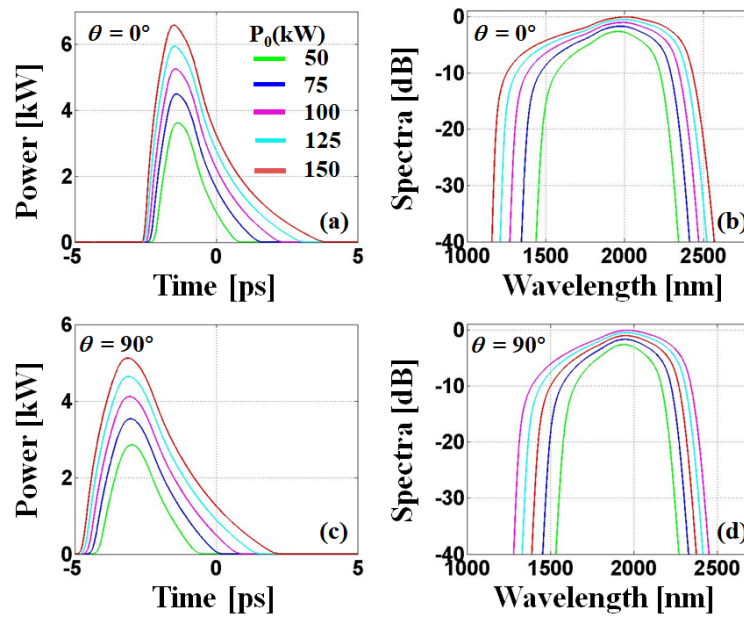


Figure 7. The output pulses polarized along the slow (a) (b) and fast (c) (d) axes temporally (a) (c) and spectrally (b) (d) at the 0.3-m PM fiber end for the input pulses with different P_0 , where $\lambda_0 = 1920$ nm, $T_{\text{FWHM}} = 0.1$ ps, $d_l = 0.1$ μm , $d_2 = 0.2$ μm , $d_c = 2.8$ μm

图 7. 不同输入脉冲峰值功率 P_0 时输出脉冲在 0.3m 光纤中沿慢轴(a) (b)和快轴(c) (d)偏振的时域图(a) (c)和频谱图(b) (d), 其中 $\lambda_0 = 1920$ nm, $T_{\text{FWHM}} = 0.1$ ps, $d_l = 0.1$ μm , $d_2 = 0.2$ μm , $d_c = 2.8$ μm

此外, 如图 8 所示, 当具有不同脉冲宽度 T_{FWHM} 值的 150 kW 脉冲耦合到保偏光纤中时, 随着脉冲宽度的增加, 输出脉冲的频谱逐渐变窄。当 T_{FWHM} 大于 0.1 ps 时, 脉冲在传播初期出现振荡, 随着传播距离的增加, 这种振荡逐渐减弱, 甚至如图 8(b)所示在输出端消失。但是, 如图 8(d)所示, 当 T_{FWHM} 大于 1 ps 时, 输出脉冲会留有明显的振荡。因此, 选择脉冲宽度为 0.1 ps 有利于产生平顶 SC。

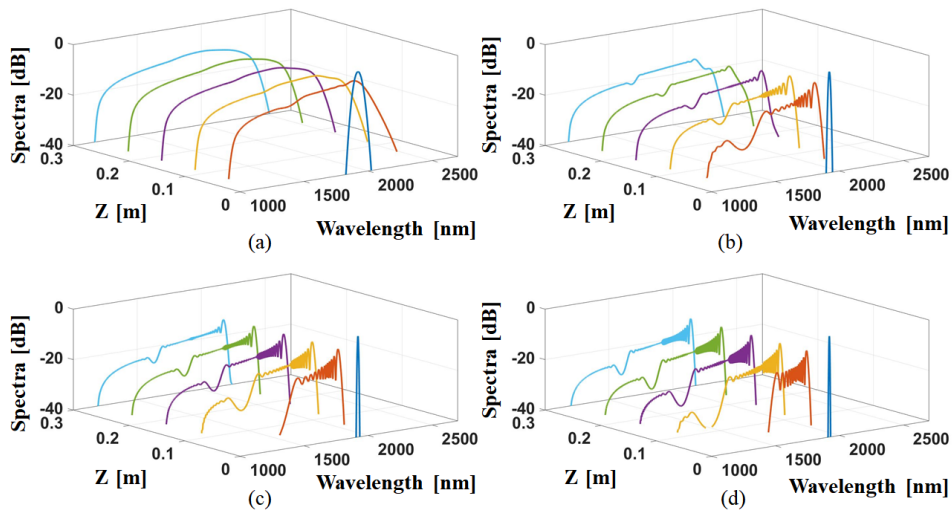


Figure 8. The evolution of the spectrum of T_{FWHM} pump pulses with different pulse widths with the propagation distance Z : (a) $T_{\text{FWHM}} = 0.1$ ps; (b) $T_{\text{FWHM}} = 0.4$ ps; (c) $T_{\text{FWHM}} = 0.7$ ps; (d) $T_{\text{FWHM}} = 1$ ps

图 8. 具有不同脉宽 T_{FWHM} 泵浦脉冲的频谱随传播距离 Z 的演变图: (a) $T_{\text{FWHM}} = 0.1$ ps; (b) $T_{\text{FWHM}} = 0.4$ ps; (c) $T_{\text{FWHM}} = 0.7$ ps; (d) $T_{\text{FWHM}} = 1$ ps

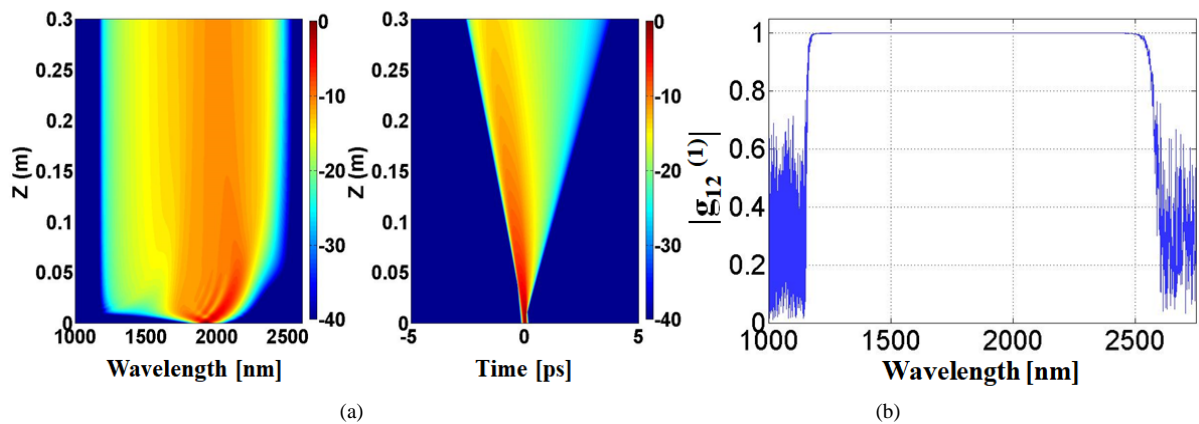


Figure 9. The spectral (Left) and temporal (right) evolution with (a) the propagation distance and (b) the degree of coherence $|g_{12}^{(1)}|$ of the pulse at the propagation distance of 0.3 m, where $\lambda_0 = 1920$ nm, $P_0 = 150$ kW and $T_{FWHM} = 0.1$ ps
图 9. (a) 脉冲频谱(左)和时域(右)演化与传播距离的关系图; (b) 传播距离为 0.3 m 时脉冲的相干度 $|g_{12}^{(1)}|$ 。泵浦脉冲的中心波长为 1920 nm, 峰值功率为 150 kW, 脉宽为 0.1 ps

当中心波长为 1920 nm, 峰值功率为 150 kW, 脉宽为 0.1 ps 泵浦脉冲沿着慢轴耦合到保偏光纤中时, 脉冲频谱和时域随传播距离的演变如图 9(a)所示。可以看出, 在初始阶段, 自相位调制(SPM)产生的光谱的蓝端可以延伸到大约 1200 nm。在长波长侧, 由 SPM 产生的光谱结合受激拉曼散射(SRS)的效应可以扩展到 2600 nm。对于 1920 nm 窗口的激光, 掺铒或铒/镱共掺光纤激光器可以是一个很好的泵浦激光源, 因为它们具有高功率、大散热、优异的光束质量和鲁棒性。因此, 通过使用光纤激光器作为泵浦激光源来产生具有平坦光谱分布的 1000 nm 至 2500 nm 范围内的近红外光谱是有趣的。此外, 一阶相干的复度数可以在 SC 中的每个波长处定义[28]。如图 9(b)所示, 在输出 SC 光谱的整个光谱范围内, 相干度几乎是完美的 1, 但是在光谱两端快速下降并出现振荡。因此, 超连续光谱表现出极好的相干性。此外, 传播距离为 0.3 m 时输出脉冲的频谱图如图 10 所示, 由于光纤的全正常平坦色散分布, 频率分量在时域中单调地分布在脉冲轮廓上。

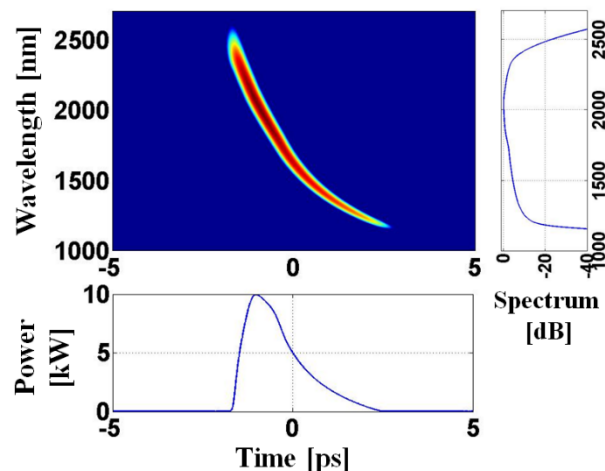


Figure 10. The calculated spectrogram of the pulse at the propagation distance of 0.3 m. The other parameters are identical to those of Figure 9

图 10. 传播距离为 0.3 m 时脉冲的光谱图, 其他参数与图 9 相同

4. 结论

本文提出了一种基于保偏高掺锗石英光纤的方法来获得光纤中的低且平坦的色散, 通过在掺锗石英纤芯中增加椭圆空气孔引入高双折射。此外, 通过调整光纤参数, 如 GeO_2 浓度、椭圆空气孔的长短轴的大小以及掺锗纤芯的芯径, 所提出的光纤可以为两个正交偏振基模提供相对高的非线性参数、低损耗和平坦的法向群速度色散分布。数值结果表明, 峰值功率为 150 kW, 中心波长为 1920 nm, 脉宽为 0.1 ps 的泵浦脉冲沿 y 偏振方向(慢轴)耦合到长度为 0.3 m 的保偏光纤中, 输出光谱可以在 -20 dB 处覆盖一个倍频(波长范围是 1200~2500 nm)。同时, 输出脉冲在整个波长范围内具有很好的相干性。

致 谢

本论文的工作是在我的导师王春灿副教授的悉心指导下完成的, 王老师严谨认真的科研态度令我敬佩, 是我学习的榜样。在我遇到问题时, 王老师总能不厌其烦的开导与教育, 衷心感谢三年来王老师对我学习及生活上的帮助。感谢师姐李婧、师弟安海涛在撰写论文过程中对我提供的帮助。

基金项目

国家自然科学基金(No. 61575018)资助。

参考文献

- [1] Wang, C., Kim, J., Jin, C.T., *et al.* (2012) Near Infrared Spectroscopy in Optical Coherence Tomography. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, **20**, 237-247. <https://doi.org/10.1255/jnirs.975>
- [2] Alexis, L., Alessandro, T., Vincent, C., *et al.* (2012) Compact Supercontinuum Sources and Their Biomedical Applications. *Optical Fiber Technology*, **18**, 375-378. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2012.08.003>
- [3] Tu, H. and Boppart, S.A. (2013) Coherent Fiber Supercontinuum for Biophotonics. *Laser & Photonics Reviews*, **7**, 628-645. <https://doi.org/10.1002/lpor.201200014>
- [4] Levick, A.P., Greenwell, C.L., Ireland, J., *et al.* (2014) Spectral Radiance Source Based on Supercontinuum Laser and Wavelength Tunable Bandpass Filter: The Spectrally Tunable Absolute Irradiance and Radiance Source. *Applied Optics*, **53**, 3508-3519. <https://doi.org/10.1364/AO.53.003508>
- [5] Heidt, A.M. (2010) Pulse Preserving Flat-Top Supercontinuum Generation in All-Normal Dispersion Photonic Crystal Fibers. *Journal of the Optical Society of America B*, **27**, 550-559. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.27.000550>
- [6] Huang, C.L., Liao, M.S., Bi, W.J., *et al.* (2018) Ultraflat, Broadband, and Highly Coherent Supercontinuum Generation in All-Solid Microstructured Optical Fibers with All-Normal Dispersion. *Photonics Research*, **6**, 601-608. <https://doi.org/10.1364/PRJ.6.000601>
- [7] Klimczak, M., Michalik, D., Stepniowski, G., *et al.* (2019) Coherent Supercontinuum Generation in Tellurite Glass Regular Lattice Photonic Crystal Fibers. *Journal of the Optical Society of America B*, **36**, A112-A124. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.00A112>
- [8] Saini, T.S., Kumar, A. and Sinha, R.K. (2015) Broadband Mid-Infrared Supercontinuum Spectra Spanning 2-15 μm Using As_2Se_3 Chalcogenide Glass Triangular-Core Graded-Index Photonic Crystal Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, **33**, 3914-3920. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2418993>
- [9] Hoang, V.T., Rafał, K., Adam, F., *et al.* (2019) Supercontinuum Generation in an All-Normal Dispersion Large Core Photonic Crystal Fiber Infiltrated with Carbon Tetrachloride. *Optical Materials Express*, **9**, 2264-2278. <https://doi.org/10.1364/OME.9.002264>
- [10] Wang, C. and Bache, M. (2015) Coherent Near-mid-IR Supercontinuum Generation in Highly Nonlinear Multi-Cladding Liquid-Core Fiber Designed for Flat Normal Dispersion.
- [11] Wang, C. and Li, J. (2018) Saturable Absorber Based on the CS_2 -Filled Dual-Core Fiber Coupler. *Optics Express*, **26**, 22144-22159. <https://doi.org/10.1364/OE.26.022144>
- [12] Wang, C., Jia, C., Yang, J., *et al.* (2020) Numerical Simulation of the CS_2 -Filled Active Fiber with Flattened All-Normal Dispersion. *IEEE Photonics Journal*. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.3044918>
- [13] Wang, C., Wang, M. and Wu, J. (2015) Heavily Germanium-Doped Silica Fiber with a Flat Normal Dispersion Profile. *IEEE Photonics Journal*, **7**, Article ID: 7101110. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2409232>

- [14] Anashkina, E.A., Andrianov, A.V., Koptev, M.Y., *et al.* (2012) Generating Tunable Optical Pulses over the Ultrabroad Range of 1.6-2.5 μm in GeO_2 -Doped Silica Fibers with an Er: Fiber Laser Source. *Optics Express*, **20**, 27102-27107. <https://doi.org/10.1364/OE.20.027102>
- [15] Anashkina, E.A., Andrianov, A.V., Koptev, M.Y., *et al.* (2014) Towards Mid-Infrared Supercontinuum Generation with Germane-Silicate Fibers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **20**, Article ID: 7600608. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2321286>
- [16] Zhang, M., Kelleher, E.J.R., Runcorn, T.H., *et al.* (2013) Mid-Infrared Raman-Soliton Continuum Pumped by a Nanotube-Mode-Locked Sub-Picosecond Tm-Doped MOPFA. *Optics Express*, **21**, 23261-23271. <https://doi.org/10.1364/OE.21.023261>
- [17] Dianov, E.M. and Mashinsky, V.M. (2005) Germania-Based Core Optical Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, **23**, 3500-3508. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.855867>
- [18] Liu, Y., Zhao, Y., Lyngso, J., *et al.* (2015) Suppressing Short-Term Polarization Noise and Related Spectral Decoherence in All-Normal Dispersion Fiber Supercontinuum Generation. *Journal of Lightwave Technology*, **33**, 1814-1820. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2397276>
- [19] Tarnowski, K., Martynkien, T., Mergo, P., *et al.* (2017) Polarized All-Normal Dispersion Supercontinuum Reaching 2.5 μm Generated in a Birefringent Microstructured Silica Fiber. *Optics Express*, **25**, 27452-27463. <https://doi.org/10.1364/OE.25.027452>
- [20] Genier, E., Ghosh, A.N., Bobba, S., *et al.* (2020) Cross-Phase Modulation Instability in PM ANDi Fiber-Based Supercontinuum Generation. *Optics Letters*, **45**, 3545-3548. <https://doi.org/10.1364/OL.397106>
- [21] Dobrakowski, D., Rampur, A., Stpniewski, G., *et al.* (2019) Development of Highly Nonlinear Polarization-Maintaining Fibers with Normal Dispersion across Entire Transmission Window. *Journal of Optics*, **21**, Article ID: 015504. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aaf4af>
- [22] Ghosh, A.N., Meneghetti, M., Petersen, C.R., *et al.* (2019) Chalcogenide-Glass Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber for Mid-Infrared Supercontinuum Generation. *Journal of Physics: Photonics*, **1**, Article ID: 044003. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab3b1e>
- [23] Fleming, J.M. (1984) Dispersion in GeO_2 - SiO_2 Glasses. *Applied Optics*, **23**, 4486-4493. <https://doi.org/10.1364/AO.23.004486>
- [24] Yuri, Y. and Mavritsky, A. (2007) D-Scan Measurement of Nonlinear Refractive Index in Fibers Heavily Doped with GeO_2 . *Optics Letters*, **32**, 3257-3259. <https://doi.org/10.1364/OL.32.003257>
- [25] Lægsgaard, J. and Tu, H. (2013) How Long Wavelengths Can One Extract from Silica-Core Fibers? *Optics Letters*, **38**, 4518-4521. <https://doi.org/10.1364/OL.38.004518>
- [26] Dudley, J.M. and Taylor, J.R. (2010) Supercontinuum Generation in Optical Fibers. Cambridge University, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511750465>
- [27] Agrawal, G.P. (2007) Nonlinear Fiber Optics. 4th Edition, Elsevier, Amsterdam.
- [28] Dudley, J., Genty, G. and Coen, S. (2006) Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber. *Reviews of Modern Physics*, **78**, 1135-1184. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1135>