

硫系化物悬吊芯光纤产生温控可调谐超连续谱

王中垚, 张甜甜, 施伟华*

南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023

摘要 设计了一种以高非线性三硫化二砷(As_2Se_3)作为纤芯、以温敏材料甲苯填充包层的悬吊芯光纤,并提出了一种产生可调谐超连续谱(SC)的方法。通过全矢量有限元法数值模拟了光纤中传输光的色散和非线性特性,利用非线性薛定谔方程和分步傅里叶算法分析了在甲苯临界温度为 $-90\sim 110\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内产生的 SC,并进行了结构参数和泵浦参量的优化;引入光谱平坦度(SFM)的概念,对模拟产生的 SC 进行定量分析。研究发现,当光纤纤芯直径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,利用中心波长为 $3.1\text{ }\mu\text{m}$ 、峰值功率为 20 kW 、脉冲宽度为 300 fs 的泵浦源可在临界温度下实现 $1.20\text{ }\mu\text{m}$ 光谱宽度的调谐;随着可调谐光谱宽度的增大,SFM略有下降,SFM的取值范围为 $0.89\sim 0.92$,这说明 SC 保持平坦。产生的可调谐 SC 在物质探测、光谱学和环境分析等领域具有广阔的应用前景。

关键字 光纤光学; 超连续谱; 可调谐光谱; 悬吊芯光纤; 温控; 光谱平坦度

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0306001

1 引言

超连续谱(SC)本身具有宽光谱、高亮度和高相干性的特点,有望被广泛应用于光谱学^[1-2]、生物医学^[3]、环境检测^[4]等领域。近年来,SC的波段覆盖了红外^[5-7]、紫外^[8]和可见光波段^[7,9]。而可调谐 SC 光源的谱宽灵活可控,其输出光谱的范围可调,更容易满足应用需求,成为一个新的研究热点。2015年,Møller等^[10]设计出低损耗的 $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$ 悬吊芯型光纤,利用毫瓦级泵浦源产生了波长范围为 $1.7\sim 7.5\text{ }\mu\text{m}$ 的 SC,并通过仿真和实验证实了自相位调制对 SC 产生起主要作用。2016年,Raj等^[11]选用 CS_2 作为光纤纤芯,通过调整温度和泵浦参数,使得 SC 产生的最大可调谐范围为 $688\sim 1022\text{ nm}$ 。2017年,熊梦杰等^[12]提出并制备了一种新型纤芯结构的光子晶体光纤,即在椭圆纤芯中加入一排亚微米级的空气孔以提高光纤的双折射值,通过调节抽运激光的偏振方向并旋转棱镜,实现了可调谐的宽带 SC,其可调谐的最大谱宽可达到 300 nm 。2019年,王伟等^[13]利用钛蓝宝石飞秒激光器抽运经拉锥处理的 Yb^{3+} 掺杂微结构光纤,可以获得可调谐的 SC,

随着拉锥长度的增加,SC红移边缘从 1254 nm 移至 1159 nm ,而蓝移边缘从 661 nm 移至 525 nm 。目前所研究的光纤在红外区域产生的 SC 调谐度较小。

因此本文提出一种用高温敏材料填充悬吊芯光纤、利用温度控制线性和非线性折射率以及非线性系数的变化、从而产生温控可调谐 SC 的方法。在泵浦源条件不变的情况下,通过控制温度的变化,使得在不同温度下产生的 SC 的谱宽发生变化,得到可控且调谐度较大的 SC,这为可调谐的 SC 提供了更灵活的产生方式。

2 光纤结构

2.1 结构设计

本文设计的悬吊芯光纤结构如图 1(a)所示,该结构的纤芯使用高非线性材料 As_2Se_3 ,其红外透射性良好^[14],包层为空气层,纤芯直径 d 为 $3\text{ }\mu\text{m}$,外径为 $14\text{ }\mu\text{m}$,两个支撑桥的长度为 $5.5\text{ }\mu\text{m}$,厚度 h 为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。由图可知悬吊芯光纤结构具有较高的占空比(即在包层中空气孔面积与包层的面积之比),若忽略支撑桥的厚度,则占空比值约为 1,这会

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-30; 录用日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(61571237,61275067)

*E-mail: shiwh@njupt.edu.cn

对光脉冲有更强的约束力。另外本文通过改变纤芯直径对光纤的色散进行调节。

对于所设计的悬吊芯光纤,可以采用挤压法^[15-16],即在一定的高温下通过高压将已经高温软化的硫系玻璃从一定几何形状的模具中挤出,对于具有大占空比的悬吊芯光纤,挤压法是极其有效并且实用的制备方法之一。图 1(b)为挤压法示意图,在挤压模具中加入软化的硫系玻璃,继续对模具进

行加热以防止玻璃冷却,同时对挤压模具施加压力,在出口处可以通过改变模具的结构制备不同结构的硫系化物光纤预制棒,最后通过拉丝得到微结构光纤。

基于全矢量有限元法并结合 COMSOL Multiphysics 软件对光纤结构进行仿真。图 1(c)显示的是当温度为 20 °C 时,3.1 μm 波长下的基模模式图。

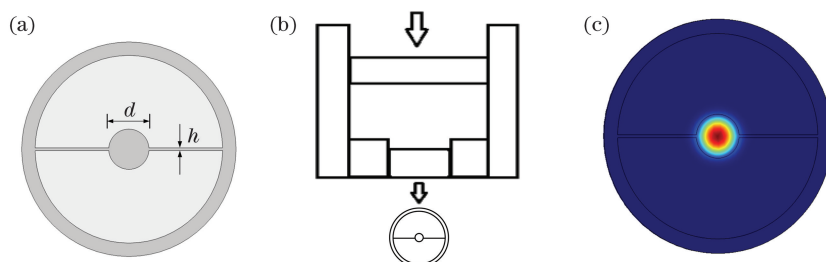


图 1 微结构光纤制备及模式图。(a) 光纤截面; (b) 挤压法制备预制棒; (c) 基模模式图

Fig. 1 Preparation and mode diagrams of microstructure fiber. (a) Fiber cross section; (b) preparation of preforms by extrusion method; (c) basic mode diagram

2.2 材料选取

普通的硅基玻璃光纤无法在红外波段产生带宽较宽的 SC。对于硫系化物玻璃,其透射谱覆盖了中红外区域,特别是 As₂Se₃ 玻璃,其透射范围为 1~13 μm^[17]。而硫系化物的非线性折射率比二氧化硅高出两个数量级以上^[18],是在中红外产生 SC 的最合适的材料之一。另外,硫系玻璃的线性折射率也较高,硫系玻璃作为光纤纤芯,对光的约束力更强。本文所设计的光纤纤芯使用高非线性材料 As₂Se₃。

对于 As₂Se₃ 材料,其满足 Sellmeier 折射率公式,材料的线性折射率与波长的关系为^[18]

$$n^2 = 1 + A_1 \lambda^2 / (\lambda^2 - L_1^2) + A_2 \lambda^2 / (\lambda^2 - L_2^2) + A_3 \lambda^2 / (\lambda^2 - L_3^2), \quad (1)$$

式中:λ 为波长,单位为 nm; A₁、A₂、A₃ 和 L₁、L₂、L₃ 为 Sellmeier 相关系数,且为固定参数^[19]。根据(1)式,可以得到 As₂Se₃ 材料的折射率随波长的变化关系,即随着波长的增加,材料折射率减小。

在微结构光纤空气孔中填充甲苯溶液,甲苯溶液的温敏性折射率变化大,这有利于产生较大的折

射率变化,且甲苯溶液的物理特性良好,凝固点低、沸点高。甲苯溶液在固定温度(20 °C)时的 Sellmeier 方程为^[20]

$$n_{\text{toluene}}(\lambda) = 1.474775 + 6990.31/\lambda^2 + 2.1776 \times 10^8/\lambda^4, \quad (2)$$

式中:n_{toluene}(λ)表示波长为λ时甲苯的折射率,波长λ的单位为 nm。

由于甲苯为高温敏液体,它的折射率也随温度的变化而变化,其不同温度下的折射率变化为

$$n_{\text{toluene}}(T) = n_0 - \alpha(T - T_0), \quad (3)$$

式中:n_{toluene}(T)表示在温度 T 时甲苯的折射率;n₀表示在参考温度 T₀ 时的折射率;α 为甲苯的温敏系数,其值为 5.273 × 10⁻⁴ °C⁻¹^[20]。

因此可由(2)、(3)式计算出甲苯在不同波长、不同温度下的折射率。表 1 中给出了甲苯和 As₂Se₃ 的一些物理特性,通过对比可以看出甲苯在温度变化上的优越性。而 As₂Se₃ 玻璃的转化温度为 187 °C^[21],相对于高温敏材料甲苯,其温度影响可以忽略不计。

表 1 材料相关物理特性^[19-21]

Table 1 Material-related physical properties^[19-21]

Material	Temperature range from freezing point to boiling point / °C	Temperature sensitivity coefficient α / °C ⁻¹	Refractive index (λ = 20 μm, 20 °C)
Toluene	-95-110.6	5.273 × 10 ⁻⁴	~1.476
As ₂ Se ₃	360 (melting point)	—	~2.790

3 理论基础及数值仿真

3.1 色散特性

在 SC 模拟仿真中,必须考虑色散随波长的变化对光纤产生的影响。色散 D 的表达式为^[22]

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \operatorname{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (4)$$

式中: c 表示光速; $\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})$ 为有效模式折射率的实部。

图 2 是在纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$ 时总色散与波长间的关系,可以看出随着波长的增加,色散也会逐渐增大。当温度为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 、波长为 $3.1 \mu\text{m}$ 时,色散为零。

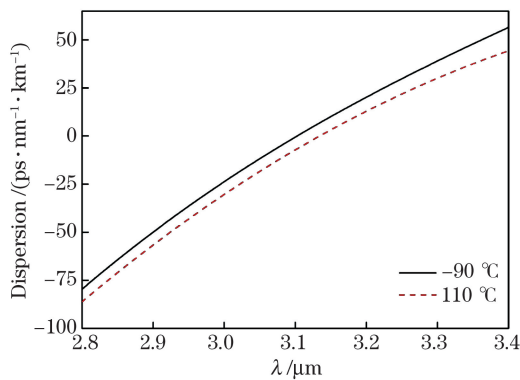


图 2 纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$ 时色散与波长间的关系

Fig. 2 Relationship between dispersion and wavelength when fiber core diameter is $3 \mu\text{m}$

改变温度,取临界温度为 $-90 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,在不同光纤纤芯直径 d 的情况下计算出零色散波长(ZDW)的具体数值,如表 2 所示,可以看出随着纤芯直径的增大,ZDW 也在逐渐增大,其主要原因可能是纤芯大小的变化对有效模式折射率有一定的影响,从而使 ZDM 发生变化。

表 2 不同纤芯直径对应的临界温度下 ZDW 的位置

Table 2 Location of ZDW at critical temperatures for different fiber core diameters μm

Temperature / $^\circ\text{C}$	$2 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{m}$	$4 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m}$
-90	2.64	3.14	3.55	3.93
110	2.61	3.10	3.50	3.90

脉冲在传输过程中,部分光能量会泄漏到包层,但由于本设计采用的高折射率纤芯材料为 As_2Se_3 ,纤芯对于光的束缚能力很强,损耗很小,所以本设计忽略了限制损耗对光纤的影响。

3.2 非线性特性

光纤的非线性特性对 SC 的展宽极为重要,光

纤的非线性系数 γ 可表示为^[22]

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}}, \quad (5)$$

式中: n_2 为非线性折射率系数; A_{eff} 为基模的有效模场面积。从(5)式中可以看出,当材料确定时,可以通过减小基模的有效模场面积 A_{eff} ,即通过改变光纤结构来控制非线性系数的大小。

改变温度,取临界温度为 $-90 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,在不同纤芯直径 d 的情况下计算出非线性系数的值,如表 3 所示。通过表 3 可知,随着纤芯直径的逐渐增大,非线性系数逐渐减小,这会影响 SC 的展宽;临界温度下相同纤芯直径的差值减小,这不利于可调谐谱宽的增大。

表 3 不同纤芯直径对应的临界温度下的非线性系数

Table 3 Nonlinear coefficients at different critical temperatures for different fiber core diameters

Temperature / $^\circ\text{C}$	$10^{-9} \text{ W} \cdot \text{nm}^{-1}$			
	$2 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{m}$	$4 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m}$
-90	6.6097	2.8019	1.4122	0.8330
110	6.6905	2.8293	1.4245	0.8397

4 SC 产生与分析

SC 的产生要综合考虑各种光纤中的非线性因素对光谱展宽产生的影响,一般采用广义的非线性薛定谔方程(GNLSE)模拟光脉冲在光纤中传输的过程,其方程式如下^[23]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A - i \sum_{k \leq 1} \frac{i^k \beta_k}{k!} \frac{\partial^k A}{\partial t^k} = i\gamma \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \times \left[A(z, t) \int_{-\infty}^{\infty} R(t') |A(z, t-t')|^2 dt' \right], \quad (6)$$

式中: ω_0 为中心频率; A 为脉冲包络; z 为传输距离; α 为限制损耗; β_k 为 k 阶色散系数,表示各阶色散对脉冲展宽的影响; $R(t')$ 表示包括拉曼和克尔非线性在内的响应函数,其表达式为

$$R(t) = (1 - f_R) \delta(t) + f_R \left(\frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1^2 \tau_2^2} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \sin\left(\frac{t}{\tau_1}\right), \quad (7)$$

式中: f_R 表示延时拉曼响应的分数贡献,对于本文 As_2Se_3 材料, $f_R = 0.148$; $\tau_1 = 23 \text{ fs}$; $\tau_2 = 225 \text{ fs}$; $\delta(t)$ 为单位脉冲函数。所选用的光纤长度为 3 cm 。所选用材料的非线性系数比 SiO_2 大 2 个数量级,所以无需通过增加传输距离来增加光谱展宽。

光谱平坦度(SFM)的定义是功率谱的几何平均值与算数平均值之比,可表示为^[24]

$$R_{\text{SFM}} = \left(\prod_{k=1}^N s_k^2 \right)^{\frac{1}{N}} / \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s_k^2 \right), \quad (8)$$

式中: s_k 为光谱采样点; N 为采样点的总个数。SFM 越趋近于 1, 表示 SFM 越好; SFM 越趋近于 0, 表示 SFM 越差。本设计是在光谱强度为 -50 dB 的条件下对光谱进行采样, 并在此范围内进行测量。

下面基于非线性薛定谔方程和分步傅里叶算法进行 SC 的数值分析。分别在 110°C 和 -90°C 两个临界温度下对主要结构参数和泵浦参量变化对 SC 的影响进行数值模拟, 以 -90°C 时的零色散点作为泵浦中心波长。

4.1 不同纤芯直径在最优泵浦条件下的对比

通过改变纤芯直径, 得到 SC 的变化, 如图 3 所示。在图 3(a) 中, 通过优化泵浦参数, 发现在峰值功率 P_0 为 20 kW、脉冲展宽为 600 fs 时, 光谱可调谐宽度达到最大, 即在光谱强度为 -50 dB 的情况

下, 通过控制温度变化, 可调谐谱宽达到 $0.25 \mu\text{m}$ 。图 3(b) 中, 峰值功率为 20 kW、脉冲展宽为 300 fs 时, 可调谐谱宽达到最大, 即在光谱强度为 -50 dB 的情况下, 可调谐谱宽为 $1.20 \mu\text{m}$ 。图 3(c) 中, 峰值功率为 25 kW、脉冲展宽为 250 fs 时, 可调谐谱宽在光谱强度为 -50 dB 的情况下为 $0.11 \mu\text{m}$ 。而图 3(d) 中, 峰值功率为 15 kW、脉冲展宽为 150 fs 时, 可调谐谱宽达到最大, 但在光谱强度为 -50 dB 的情况下可调谐谱宽不足 $0.1 \mu\text{m}$ 。在不同的纤芯直径下, 随着纤芯直径逐步减小, 非线性系数 γ 逐渐增大, 而 γ 的增大非常有利于产生更宽的光谱 (表 4)。另外, 随着有效模场面积的增大, 在两个临界温度下 γ 的差值也会增大, 这使得可调谐谱宽差值变大, 但由于泵浦源参数的可变性, 随着抽运波长逐渐蓝移, 可调谐范围变得不明显。而图 3(b) 中可调谐谱宽最大, 为 $1.20 \mu\text{m}$ 。

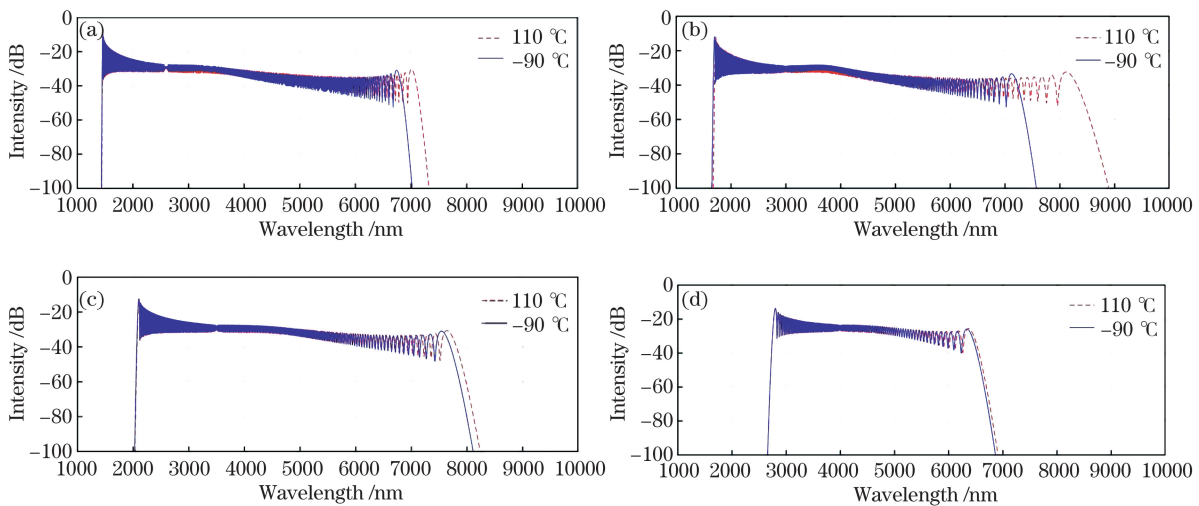


图 3 不同纤芯直径下产生的 SC。(a) 纤芯直径为 $2 \mu\text{m}$; (b) 纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$; (c) 纤芯直径为 $4 \mu\text{m}$; (d) 纤芯直径为 $5 \mu\text{m}$
 Fig. 3 SC generated under different fiber core diameters. (a) Fiber core diameter is $2 \mu\text{m}$; (b) fiber core diameter is $3 \mu\text{m}$; (c) fiber core diameter is $4 \mu\text{m}$; (d) fiber core diameter is $5 \mu\text{m}$

根据图 3 中的数据, 可以计算出对应的 SFM, 如表 4 所示。

表 4 不同纤芯直径、临界温度下的光谱平坦度

Table 4 Spectral flatness at critical temperatures for different fiber core diameters

Temperature / $^\circ\text{C}$	$2 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{m}$	$4 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m}$
-90	0.8879	0.8765	0.9024	0.9156
110	0.8942	0.8714	0.9022	0.9156

可以看出, 当纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$ 时, -90°C 和 110°C 时的 SFM 分别为 0.8765 和 0.8714 。而 SFM 的变化规律并不明显, 这是由于分析中只考虑

了最优泵浦参数时的可调谐范围, 而没有比较脉冲宽度和峰值功率对 SFM 产生的影响。从 (8) 式可以看出 SFM 会受到光谱包络幅度和光谱振荡幅度两方面的影响。另外, 短波长处光谱能量的增大是由于受到色散波的强烈作用, 长波长处的光谱延展主要是由于自相位调制占主导作用, 自陡峭效应导致脉冲不再对称, 交叉相位调制和四波混频导致频谱进一步拓展, 但光谱能量会逐渐下降, 最终达到饱和。

4.2 不同初始脉冲展宽的对比

当光纤纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$ 时, 对泵浦源脉冲展宽进行优化, 图 4(a) ~ (d) 表示当峰值功率为 20 kW 时脉冲宽度分别为 $280, 300, 320, 340$ fs 时的

可调谐 SC。可以发现,当峰值功率不变时,随着脉冲宽度的增加,可调谐范围逐渐减小。通过计算也得出:在初始脉冲宽度为 280 fs、输出功率为 -50 dB 的情况下,可调谐谱宽达到 $1.51 \mu\text{m}$ 。在初始脉冲宽度为 300 fs 时,可调谐谱宽达到 $1.20 \mu\text{m}$;在初始脉冲宽度为 320 fs 时,可调谐谱宽为 $0.85 \mu\text{m}$;在初

始脉冲宽度为 340 fs 时,可调谐谱宽为 $0.62 \mu\text{m}$ 。而随着脉冲宽度的增大,SFM 也在逐渐增大。产生可调谐性和 SFM 变化的原因是由于在不同温度下两种状态下的非线性系数以及高阶色散不同,综合考虑 SC 的可调谐性和平坦度,选取 300 fs 为初始脉冲宽度的优化值。

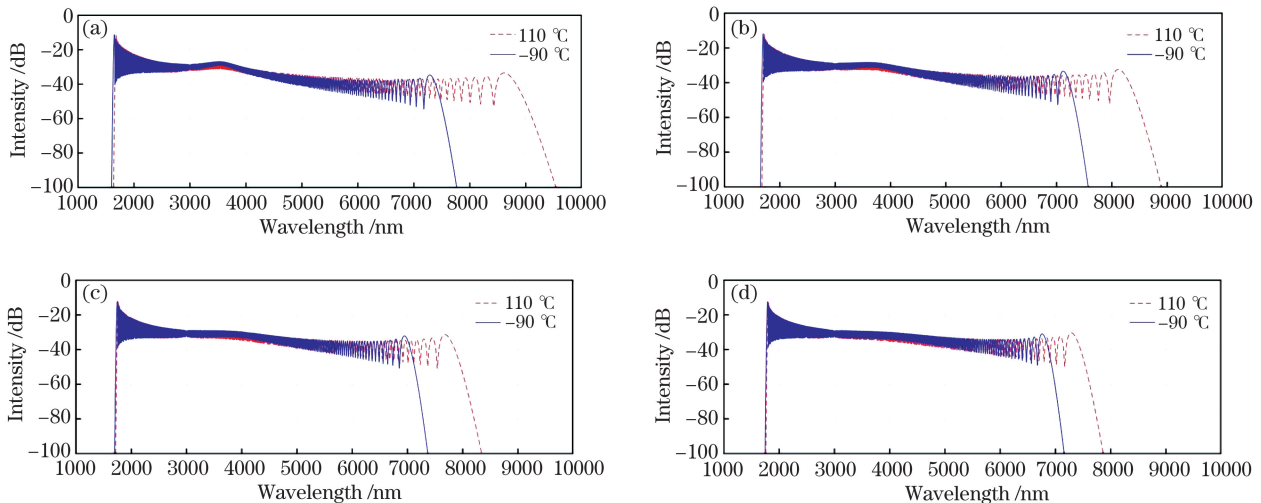


图 4 不同初始脉冲宽度、临界温度下的可调谐 SC。(a)初始脉冲宽度为 280 fs;(b)初始脉冲宽度为 300 fs;(c)初始脉冲宽度为 320 fs;(d)初始脉冲宽度为 340 fs

Fig. 4 Tunable SC for different critical temperatures and initial pulse widths. (a) Initial pulse width is 280 fs; (b) initial pulse width is 300 fs; (c) initial pulse width is 320 fs; (d) initial pulse width is 340 fs

4.3 不同峰值功率间的对比

当光纤纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$ 时,对泵浦峰值功率进行优化,图 5(a)~(d)表示当初始脉冲宽度为 300 fs 时,峰值功率分别为 18, 20, 22, 24 kW 时的可调谐 SC。可以看出,当初始脉冲宽度不变时,随着

峰值功率的增加,SC 谱宽整体也在增大,这是由于随着峰值功率的增大,自相位调制效应使得光谱展开,交叉相位调制和四波混频效应的作用使得 SC 进一步展宽。另外可以通过计算得出:在峰值功率为 18 kW、输出功率为 -50 dB 的情况下,两个临界

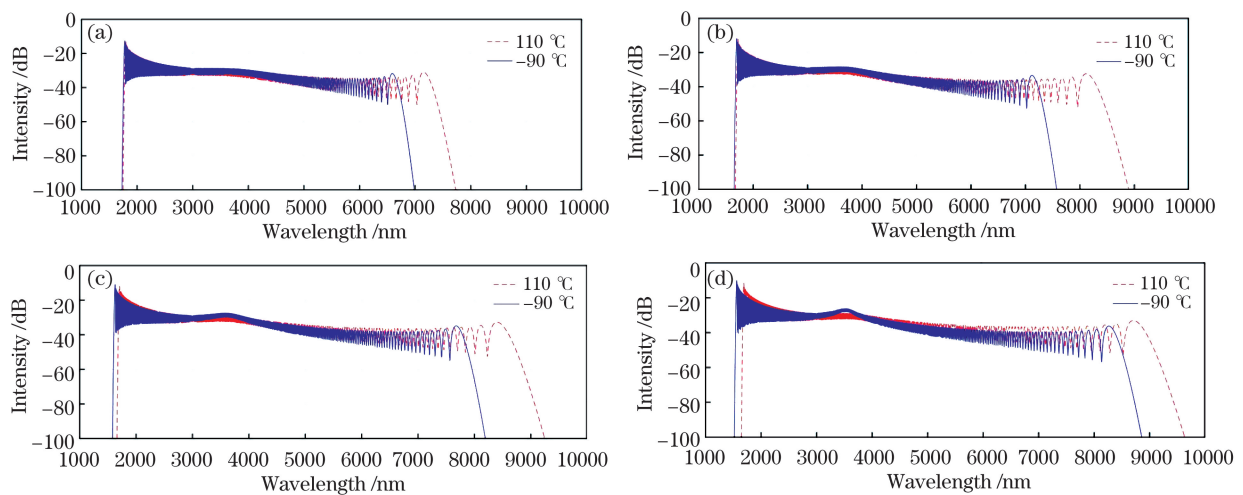


图 5 不同峰值功率、临界温度下的可调谐 SC。(a)峰值功率为 18 kW;(b)峰值功率为 20 kW;(c)峰值功率为 22 kW;(d)峰值功率为 24 kW

Fig. 5 Tunable SC at different critical temperatures and peak powers. (a) Peak power is 18 kW; (b) peak power is 20 kW; (c) peak power is 22 kW; (d) peak power is 24 kW

温度下的可调谐谱宽为 $0.67 \mu\text{m}$; 峰值功率为 20 kW 时, 可调谐谱宽为 $1.20 \mu\text{m}$; 在峰值功率为 22 kW 时, 可调谐谱宽为 $1.02 \mu\text{m}$; 在峰值功率为 24 kW 时, 可调谐谱宽为 $0.55 \mu\text{m}$ 。而随着峰值功率的增大, SFM 减小。引起可调谐性及 SFM 变化的原因可能是不同温度下的非线性系数和高阶色散不同, 导致不同峰值功率下的谱宽变化量不同。综合考虑 SC 可调谐性和平坦度, 选取 20 kW 为泵浦峰值功率的优化值。

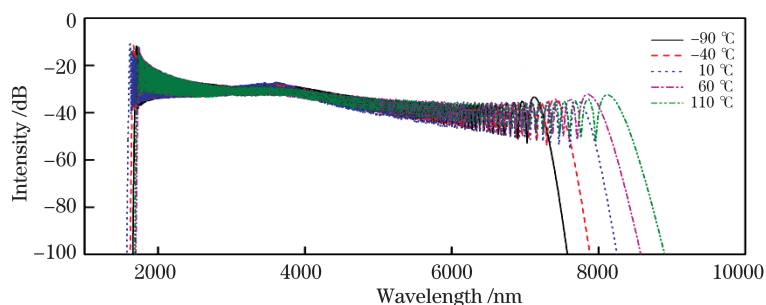


图 6 在不同温度下产生的可调谐 SC

Fig. 6 Tunable SC produced at different temperatures

仿真计算中选取了 $-90 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $110 \text{ }^\circ\text{C}$, 这两个温度接近甲苯凝固点到沸点的临界温度, 探讨了理论极限下能达到的最大可调谐度。基底材料 As_2S_3 玻璃的转化温度和熔融温度大于本文中探讨的最高温度, 所以在讨论的温度范围内可忽略温度对光纤的结构及性能产生的影响。

5 结 论

设计了一种液体包层微结构光纤, 以 As_2S_3 为纤芯、甲苯为液体包层, 研究了其色散特性、非线性变化和 SFM。通过温控实现了在长波长处光谱谱宽的可调谐。该光纤具有高非线性, 包层折射率对温度比较敏感。通过改变结构的有效折射率控制光纤非线性系数, 从而使得不同温度下的光谱谱宽随之发生改变。优化光纤结构和泵浦参数, 通过模拟得到在温度为 $-90 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 的临界条件下, 光脉冲通过纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$ 、外径为 $14 \mu\text{m}$ 的微结构光纤时, 产生的最大可调谐光谱宽度可达到 $1.20 \mu\text{m}$ 。本文研究对于温控实现 SC 的可调谐的应用和优化具有一定的参考意义。

参 考 文 献

[1] Paluszkiwicz C, Kwiatek W M, Banaś A, et al. SR-FTIR spectroscopic preliminary findings of non-cancerous, cancerous, and hyperplastic human

4.4 不同温度下产生的 SC

当光纤纤芯为 $3 \mu\text{m}$ 时, 在泵浦波长为 $3.1 \mu\text{m}$ 、峰值功率为 20 kW 、脉冲展宽为 300 fs 的泵浦源情况下, 对温度为 $-90, -40, 10, 60, 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 时产生的 SC 进行了比较。如图 6 所示, 随着温度的逐渐增加, 超连续谱在短波长处变化不大, 在长波长处逐渐红移, 获得了温控可调谐 SC。实现该过程的原理是温度的增大导致光纤的有效模式折射率减小, 其模场面积也会随之减小, 此时非线性系数 γ 增大, 谱宽也会增大。

prostate tissues[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2007, 43(1): 237-242.

- [2] Thorpe M J, Hudson D D, Moll K D, et al. Cavity-ringdown molecular spectroscopy based on an optical frequency comb at 1.45-1.65 micron [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(3): 307-309.
- [3] Waynant R W, Ilev I K, Gannot I. Mid-infrared laser applications in medicine and biology[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, 359(1780): 635-644.
- [4] Mukherjee A, Porten S V D, Patel C K N. Standoff detection of explosive substances at distances of up to 150m [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(11): 2072-2078.
- [5] Zou B Y, Dai J N, Hong W Y. Study on supercontinuum generation of femtosecond double pulses bound-state in optical fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0706003. 邹宝英, 戴佳男, 洪伟毅. 光纤中飞秒双脉冲束缚态产生超连续谱的研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0706003.
- [6] Kalantari M, Karimkhani A, Saghaei H. Ultra-wide mid-IR supercontinuum generation in As_2S_3 photonic crystal fiber by rods filling technique [J]. *Optik*, 2018, 158: 142-151.
- [7] Chen L J, Song R, Hou J. Visible to near-infrared supercontinuum generated by random fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1136001.

- 陈兰剑, 宋锐, 侯静. 随机光纤激光器输出可见光至近红外波段超连续谱[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1136001.
- [8] Zhang T T, Shi W H. Numerical research on ultraviolet supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301012.
张甜甜, 施伟华. 光子晶体光纤产生紫外超连续谱的数值研究[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301012.
- [9] Wang N, Chen S P, Qi X, et al. Ultraviolet-extended flat SC generation in seven-core photonic crystal fiber[C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [10] Møller U, Yu Y, Kubat I, et al. Multi-milliwatt mid-infrared supercontinuum generation in a suspended core chalcogenide fiber [J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3282-3291.
- [11] Raj G J, Raja R V J, Nagarajan N, et al. Tunable broadband spectrum under the influence of temperature in IR region using CS₂ core photonic crystal fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(15): 3503-3509.
- [12] Xiong M J, Li J Y, Luo X, et al. Experimental and numerical study of tuneable supercontinuum generation in new kind of highly birefringent photonic crystal fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 094204.
熊梦杰, 李进延, 罗兴, 等. 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[J]. 物理学报, 2017, 66(9): 094204.
- [13] Wang W, Zuo Y T, Dong T T, et al. Experimental study of supercontinuum generation in Yb³⁺-doped microstructure fiber pumped by femtosecond pulses [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(13): 134206.
王伟, 左玉婷, 董婷婷, 等. 飞秒脉冲抽运掺镱微结构光纤产生超连续谱的实验研究[J]. 物理学报, 2019, 68(13): 134206.
- [14] Shiryaev V S, Churbanov M F. Trends and prospects for development of chalcogenide fibers for mid-infrared transmission[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2013, 377: 225-230.
- [15] Ebendorff-Heidepriem H, Monro T M. Extrusion of complex preforms for microstructured optical fibers [J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15086-15092.
- [16] Zhu Q D, Wang X S, Zhang P Q, et al. Fabrication and optical properties of chalcogenide As₂S₃ suspended-core fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1206004.
祝清德, 王训四, 张培晴, 等. 硫系 As₂S₃ 悬吊芯光纤制备及其光谱性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206004.
- [17] Deng DH, Liu L, Tuan T H, et al. Mid-infrared supercontinuum covering 3-10 μm using a As₂Se₃ core and As₂S₅ cladding step-index chalcogenide fiber[C]//Advanced Solid State Lasers 2015, October 4-9, 2015. Berlin, Germany. Washington, DC: OSA, 2015: ATu2A.32.
- [18] Yan Z. Research on the generation of 2-10 μm supercontinuum based on As₂Se₃ PCF [D]. Changsha: Hunan University, 2015: 28.
闫政. 基于 As₂Se₃ PCF 产生 2~10 μm SC 的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 28.
- [19] Saghaei H, Ebnali-Heidari M, Moravvej-Farshi M K, et al. Midinfrared supercontinuum generation via As₂Se₃ chalcogenide photonic crystal fibers [J]. Applied Optics, 2015, 54(8): 2072-2079.
- [20] Samoc A. Dispersion of refractive properties of solvents: chloroform, toluene, benzene, and carbon disulfide in ultraviolet, visible, and near-infrared[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(9): 6167-6174.
- [21] Taylor P C, Bishop S G, Mitchell D L. Temperature dependence of local order in the layer-type liquid semiconductors As₂Se₃ and Tl₂Se · As₂Te₃ [J]. Physical Review Letters, 1971, 27(7): 414-416.
- [22] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. 3rd ed. Singapore: Academic Press, 2005: 7-13, 39-45.
- [23] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. New York: Springer, 2000: 469-476.
- [24] Liang T, Li W, Feng G Y. Numerical simulation of supercontinuum generation in liquid-filled photonic crystal fibers with a normal flat dispersion profile[J]. Optics Communications, 2015, 334: 196-202.

Tunable Supercontinuum Generation in Chalcogenide Suspension Core Fibers via Temperature Control

Wang Zhongyao, Zhang Tiantian, Shi Weihua*

*College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China*

Abstract

Objective At present, a supercontinuum (SC) has characteristics of wide spectrum, high brightness, and high coherence, and thus it can be widely used in spectroscopy, biomedicine, environmental detection, and other fields. In recent years, the spectral range of SC has covered infrared, ultraviolet, and visible bands. Due to the controllability of the spectral width, the tunable SC has a wider spectrum and an adjustable spectral range, and can be applied in many areas. However, most of the SC studies in current papers are tuning SC range by changing pump source parameters. In addition, the SC tuning range mentioned in some papers is relatively small. Based on the above information, a method for generating tunable SC is proposed in a suspended core fiber with a highly nonlinear arsenic trisulfide (As_2Se_3) core and a toluene-filled cladding layer, which is highly sensitive to temperature. In the suspended core fiber, the linear and nonlinear refractive indexes and change in nonlinear coefficient are controlled by the thermal energy through the toluene-filled cladding layer, and a temperature-controlled tunable SC can be generated. Under conditions of unchanged pumping parameters, the spectral width of the SC at different temperatures can be changed by controlling the temperature, and a controllable and tuned SC can be obtained.

Methods The dispersion and nonlinear characteristics of the proposed optical fiber were simulated by the full vector finite element method combined with COMSOL Multiphysics software. The generalized nonlinear Schrodinger equation and the split-step Fourier algorithm were used to simulate the optical pulse transmission process in the optical fiber. As_2Se_3 was selected as the base material of the optical fiber, and the toluene-filled cladding was filled in the air holes of the optical fiber. The refractive index of the toluene solution changed with temperature, where the maximum difference of refractive index could be 0.105 at the critical temperature range of the toluene solution from $-90\text{ }^\circ\text{C}$ to $110\text{ }^\circ\text{C}$. To obtain the maximum spectral range of SC, simulations of the dispersion and nonlinear characteristics in the optical fiber and spectral range of SC at the critical temperature of the toluene solution had been completed. In addition, the concept of spectral flatness (SFM) was introduced to quantitatively analyze the SC. Considering the spectral flatness and tunable spectrum range of SC, the structural parameters and pumping conditions were optimized.

Results and Discussions This paper primarily studies SC tunability. First, the tunable range of the SC spectrum is discussed when the fiber core diameters are 2, 3, 4, and $5\text{ }\mu\text{m}$ at the critical temperatures of toluene. It can be seen that when the core diameter is $3\text{ }\mu\text{m}$, the tunable spectral width is the largest (Fig. 3). Then the tunable range of the SC is discussed when the initial pulses are 280, 300, 320, and 340 fs. It can be seen that when the initial pulse width is 300 fs, the tunable spectral width is the largest (Fig. 4). Finally, the tunable range of the SC spectrum is discussed when the pump peak powers are 18, 20, 22, and 24 kW. It is found that the tunable spectral width is the largest when the peak power is 20 kW (Fig. 5). By analyzing the tunability of the SC and the flatness of the spectrum, the results show that: at the critical temperatures of $-90\text{ }^\circ\text{C}$ and $110\text{ }^\circ\text{C}$, when the core diameter is $3\text{ }\mu\text{m}$ and the pulse width is 300 fs, the tunable spectral width is the largest, which is $1.20\text{ }\mu\text{m}$. In the end, tunability changes at -90 , -40 , 10 , and $110\text{ }^\circ\text{C}$ are discussed. The tunable spectral width increases with the increasing temperature until it reaches a critical temperature (Fig. 6). It can be seen that continuous tunability of the spectral range can be realized in the proposed suspended core fiber.

Conclusions A method for generating a tunable SC is proposed in the suspended core fiber with a highly nonlinear As_2Se_3 core and a toluene-filled cladding layer filled a highly temperature sensitive material. The fiber has high nonlinearity, and the cladding refractive index is relatively sensitive to temperature. According to the optimization of the fiber structure and pumping parameters, we find that the tunable spectral width reaches $1.20\text{ }\mu\text{m}$ under the critical conditions of $-90\text{ }^\circ\text{C}$ and $110\text{ }^\circ\text{C}$ when the fiber core diameter is $3\text{ }\mu\text{m}$, the center wavelength of the pump

pulse is $3.1 \mu\text{m}$, the peak power is 20 kW, and the pulse width is 300 fs. As the spectral width increases, SFM slightly decreases. SFM is between 0.89 and 0.92, indicating that SC remains flat. The generated tunable SC has certain research significance and advantages in the fields of material detection, spectroscopy, and environmental analysis.

Key words fiber optics; supercontinuum; tunable spectrum; suspension core fiber; temperature control; spectral flatness

OCIS codes 060.4370; 060.2390; 060.2430; 060.2400