

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240038.

光纤光缆技术与应用

田治军,董洁,侯尚林,等.低损耗螺旋结构高非线性光子晶体光纤设计[J].光通信研究,2025(2):240038.

Tian Z J, Dong J, Hou S L, et al. Design of High Nonlinear Photonic Crystal Fiber with Low Loss Spiral Structure[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240038.

低损耗螺旋结构高非线性光子晶体光纤设计

田治军,董洁,侯尚林,雷景丽,武刚,晏祖勇

(兰州理工大学理学院,兰州 730050)

摘要:【目的】硫系高非线性光纤作为一种潜在的重要光学器件,在中红外波段具有广泛的应用前景。针对红外波段光学信号处理和传输的需求,文章提出了一种硫系高非线性光纤以提高红外波段光学信号处理的效率和性能。【方法】采用有限元法作为设计和分析工具,结合高非线性材料的选择和光纤结构参数的优化,实现了在中红外波段内高效非线性效应的光纤设计。对 As_2Se_3 材料的螺旋结构高非线性光子晶体光纤(PCF)进行优化,分析了该光纤在 $1\sim 7\ \mu m$ 波长范围内的限制损耗、色散和非线性系数等光学特性。【结果】研究表明,限制损耗在波长不超过 $6.25\ \mu m$ 的范围内可低至 10^{-8} 数量级,在 $2\sim 5\ \mu m$ 的中红外波段范围内具有色散平坦特性,在 $1\sim 7\ \mu m$ 波段范围内有多个零色散点,非线性系数可高达 $248\ 630\ W^{-1}\cdot km^{-1}$ 。【结论】文章所提光纤可实现中红外波段超宽带低损耗色散平坦和高非线性,在中红外光通信和光传感领域中有潜在的应用前景。

关键词: 光纤光学;光子晶体光纤;非线性;色散;中红外波段

中图分类号: TN252

文献标志码: A

Design of High Nonlinear Photonic Crystal Fiber with Low Loss Spiral Structure

TIAN Zhijun, DONG Jie, HOU Shanglin, LEI Jingli, WU Gang, YAN Zuyong

(School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: 【Objective】As a potential important optical device, chalcogenide high nonlinear fiber has a wide application prospect in the mid-infrared region. In order to meet the requirements of optical signal processing and transmission in infrared region, a chalcogenide high nonlinear fiber is proposed to improve the efficiency and performance of optical signal processing in the infrared region. 【Methods】Using the finite element method as a design and analysis tool, combined with the selection of highly nonlinear materials and the optimization of fiber structure parameters, the fiber design with efficient nonlinear effects in the mid-infrared region is realized. The confinement loss, dispersion and nonlinear coefficient of the highly nonlinear Photonic Crystal Fiber (PCF) with spiral structure of As_2Se_3 material in the wavelength range of $1\sim 7\ \mu m$ are analyzed and optimized. 【Results】The results show that the confinement loss can be as low as 10^{-8} orders of magnitude at the wavelength range of no more than $6.25\ \mu m$. It has dispersion flattening characteristics at the mid-infrared region range of $2\sim 5\ \mu m$. There are multiple zero dispersion points in the range of $1\sim 7\ \mu m$, and the nonlinear coefficient can be as high as $248\ 630\ W^{-1}\cdot km^{-1}$. 【Conclusion】The fiber can realize ultra-wideband low loss dispersion flatness and high nonlinearity in the mid-infrared region, and has potential application prospects in the field of mid-infrared optical communication and optical sensing.

Key words: fiber optics; PCF; nonlinearity; dispersion; mid-infrared region

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)具有无限截止单模传输^[1]、高双折射^[2]、高非线性^[3]和平坦色散^[4]等独特光学特性,在过去几十年中引起了广泛的研究兴趣。其出色的非线性在超连续谱产生^[5]和布里渊光纤传感^[6]等研究中具有良好的应用潜力。利用高非线性光纤可制成特殊功能的光器件,如光纤放大器^[7]、光纤调制器^[8]和光纤传感器^[9-10]等,这些光学器件通过利用光纤中的非线性效应可以满足多种光学和光纤传感应用的需求,能够提高光纤传感

器的性能^[11]。基于 PCF 设计的灵活性,通过改变空气孔的布局 and 大小能够得到不同的光学特性。与石英玻璃相比,硫系玻璃具有优良的中远红外透过性能和极高的非线性折射率系数 n_2 ($n_2=2\times 10^{-18}\sim 20\times 10^{-18}\ m^2/W$)^[12],因此硫系玻璃成为了最值得关注的一种中红外非线性光学材料,硫系玻璃 PCF 也可以被广泛应用在非线性光学和非线性光器件等领域^[13]。

硫系玻璃 PCF 在中红外波段的应用也在高速发展,1965年,Savage等人^[14]首次报道了硫系玻璃光纤,但受当时制造工艺的限制,无法生产低损耗光纤;2000年,Lenz等人^[15]发现在以 Se 为主要元素

收稿日期:2024-03-29; 修回日期:2024-05-30; 纸质出版日期:2025-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61665005)

作者简介:田治军(1996-),男,甘肃渭源人。硕士,主要研究方向为光纤传感技术。

通信作者:侯尚林,教授。E-mail:houshanglin@vip.163.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

的光纤中具有巨大的克尔非线性效应;2008年, Fortier 等人^[16]首次测量了硫系玻璃 PCF 的布里渊和拉曼效应,发现其布里渊系数和拉曼系数分别是石英 PCF 的 100 和 180 倍,充分证明了硫系玻璃在 PCF 中的非线性调控作用;2020 年, Mamtaz 等人^[17]发表了 1 篇以 SiO₂ 为背景材料、As₂S₅ 为纤芯的 PCF,五边形排布的气孔提供了较小的有效模场面积,使其得到了 8 000 W⁻¹·km⁻¹ 的非线性系数。

在中红外波段设计高非线性 PCF 时,由于受到色散以及结构的影响,很难保证其在高非线性特性条件下保持低损耗传输。本文通过材料选择、结构设计和优化,提高了硫系高非线性光纤在中红外波段的综合性能,实现了宽带高非线性和低限制损耗的光信号传输。

1 研究方法 with 结构模型

螺旋结构 PCF 横截面如图 1(a) 所示,以半径

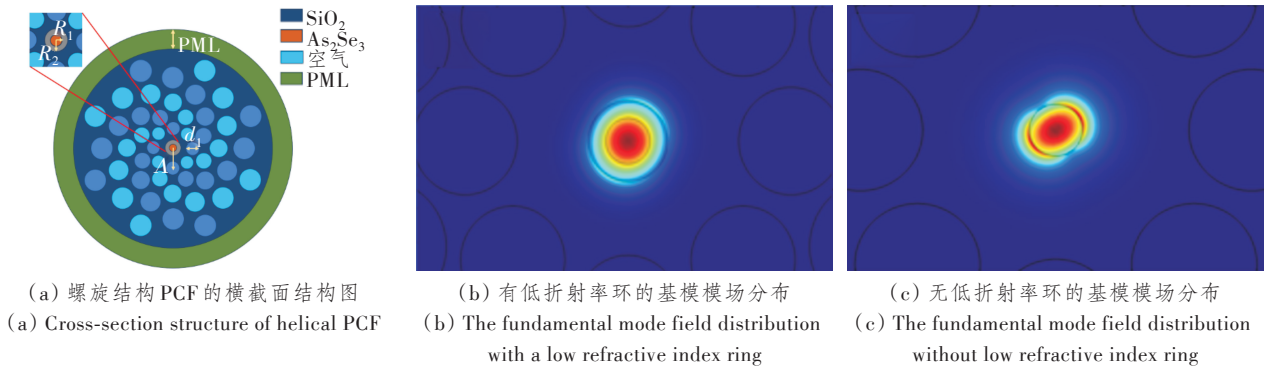


图 1 螺旋结构 PCF 的横截面结构图以及低折射率环对基模模场分布的影响

Figure 1 The cross-sectional structure of the helical PCF and the influence of the low refractive index ring on the fundamental mode field distribution

SiO₂ 和 As₂Se₃ 分别作为 PCF 的背景材料和纤芯材料时,其折射率可以通过 Sellmeir 方程计算^[18]:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1^2} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2^2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3^2}, \quad (1)$$

式中:λ 为工作波长;B_i 和 C_i 为相关材料的 Sellmeir 系数,其具体数值如表 1 所示。

表 1 标准温度下相关材料的 Sellmeir 系数

Table 1 Sellmeir coefficients of relevant materials at standard temperatures

材料	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃
As ₂ Se ₃	2.984 630 00	3.210 110 00	100.182 000 00	0.441 180 0	0.000 354 9	384.130 000
SiO ₂	0.696 166 30	0.407 942 60	0.897 479 40	0.068 404 3	0.116 241 4	98.961 610
GeO ₂	0.806 866 42	0.718 158 48	0.854 168 31	0.068 972 6	0.153 966 1	11.841 931

光纤非线性系数 γ 可定义为^[19]

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

式中:n₂ 为纤芯材料的非线性折射率系数,其数值大小主要取决于所选材料^[20];A_{eff} 为基模的有效模场

面积^[21]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2}{\iint |E|^4 dx dy}, \quad (3)$$

式中,E 为光模的横向电场分量。

光纤的限制损耗 $L_c(\lambda)$ 描述了光的泄漏量, 可表示为^[22]

$$L_c(\lambda) = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率 n_{eff} 的虚部。

单模光纤的色散(D)包括材料色散(D_m)和波导色散(D_w), 即^[23]

$$D = D_m + D_w, \quad (5)$$

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_m}{\partial \lambda^2}, \quad (6)$$

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial \lambda^2}, \quad (7)$$

式中: n_m 为材料折射率, 可使用 Sellmeier 方程计算; $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为 n_{eff} 的实部; c 为真空中的光速。

2 数值模拟与分析

2.1 限制损耗

螺旋 PCF 在 $1\sim 7\ \mu\text{m}$ 波长范围内的限制损耗 $L_c(\lambda)$ 随波长 λ 的变化曲线如图 2 所示。由图可知, $L_c(\lambda)$ 在短波长处变化不明显, 且低于 10^{-8} dB/m。但当 $\lambda > 6.25\ \mu\text{m}$ 时, $L_c(\lambda)$ 突增, 这主要是由于 λ 变大, 而纤芯尺寸并没有变大, 导致光波与光纤结构的特征尺寸相比变得更小, 使光波被限制在纤芯的能力减弱, 因而更容易发生泄漏。功率分数是光信号在传输过程中所占的功率比例, 其决定了在总输入光功率中有多少功率被传输到光纤的纤芯中。高功率分数意味着更多的光功率被有效地传输到光纤当中, 减小了光信号的损失。因此, 在不同波长范围内, 功率分数较高处, $L_c(\lambda)$ 较低, 光更容易进入纤芯。 $L_c(\lambda)$ 的高低与 PCF 内部的气孔间距以及空气孔数量密切相关, 此外, PML 由于可以吸收进入其内部的电磁波, 也会影响 $L_c(\lambda)$ 的大小。

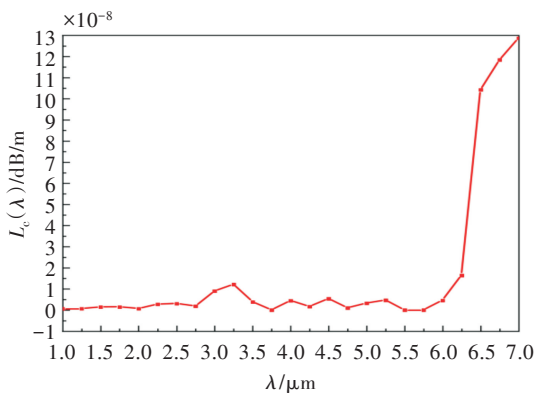
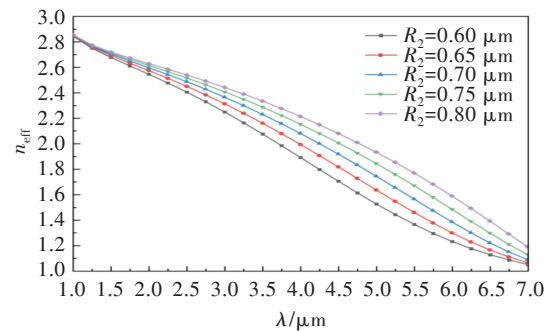


图 2 限制损耗 $L_c(\lambda)$ 随波长 λ 的变化关系

Figure 2 Relationship between confinement loss $L_c(\lambda)$ and wavelength λ

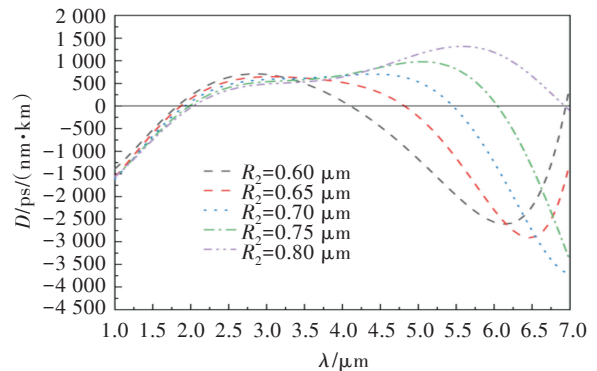
2.2 色散

在纤芯外部加入 1 个低折射率环, 能够很好地增强该光纤的非线性 and 色散等光学特性。图 3(a) 和图 3(b) 分别为折射率环半径为 $R_2=0.60, 0.65, 0.70, 0.75$ 和 $0.80\ \mu\text{m}$ 时的有效折射率 n_{eff} 和色散 D 随波长 λ 的变化关系。当 R_2 增大时, 低折射率环的作用会更加明显, 耦合进入纤芯中的光增加, 因此当 R_2 变大时, 在 n_{eff} 随 λ 的增大而减小的同时, 同一波长下 n_{eff} 曲线呈现上移。保持其他参数不变, 改变 R_2 的大小, 当 R_2 取不同值时, 在 $1\sim 7\ \mu\text{m}$ 的 λ 范围内, 每条曲线基本都有两个零色散点。当 $R_2=0.6\ \mu\text{m}$ 时, 色散曲线有 3 个零色散点, 零色散波长分别为 $\lambda=1.8, 4.1$ 和 $6.9\ \mu\text{m}$; 当 $R_2=0.65, 0.70, 0.75$ 和 $0.80\ \mu\text{m}$ 时, 色散曲线有两个零色散点, 这是由于光纤的非线性特性和波导结构的复杂交互作用, 导致不同波长下光的传播速度受多种传播模式的影响, 因而形成了多个零色散点, 并且在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中红外波段具有平坦色散特性。



(a) 有效折射率 n_{eff} 随波长 λ 的变化关系

(a) Relationship between effective refractive index n_{eff} and wavelength λ



(b) 色散 D 随波长 λ 的变化关系

(b) The relationship between dispersion D and wavelength λ

图 3 低折射率环半径从 0.6 变化到 $0.8\ \mu\text{m}$ 时 n_{eff} 和色散 D 与波长 λ 的变化关系

Figure 3 When the radius of the low refractive index ring changes from 0.6 to $0.8\ \mu\text{m}$, the effective refractive index n_{eff} and dispersion D change with the wavelength λ

2.3 非线性

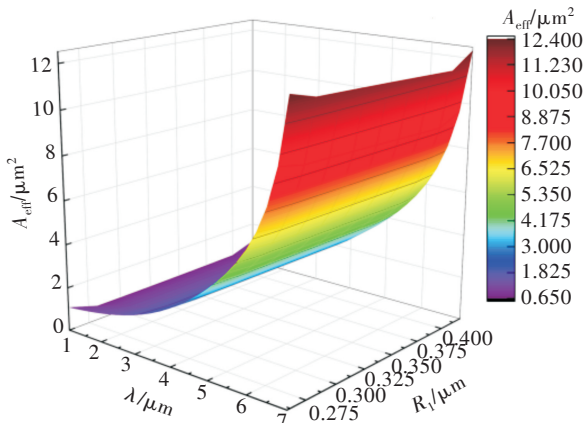
图4所示为 λ 在 $1\sim 7\ \mu\text{m}$ 之间、纤芯半径 R_1 从 $0.26\ \mu\text{m}$ 增加到 $0.42\ \mu\text{m}$ 时螺旋结构PCF的有效模场面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随 λ 变化的三维曲面图。由图可知,当 R_1 增大时,所设计光纤的 A_{eff} 先减小后增大,其原因是小尺寸的纤芯虽增加了纤芯部分的局域光能量,但是过小的纤芯尺寸会限制光的耦合能量进入纤芯,从而导致 R_1 增加时 A_{eff} 减小,这也使得图4(b)中当 $R_1=0.26\ \mu\text{m}$ 时,光纤的 γ 相对较小;当 $R_1=0.34\ \mu\text{m}$ 时, A_{eff} 为最小值,其数值为 $0.827\ \mu\text{m}^2$,此刻,由于纤芯折射率大于包层折射率而形成的全反射原理,将光场能量基本完全限制在纤芯部分,当 $\lambda=1\ \mu\text{m}$ 时, γ 达到了 $248\ 630\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,在 $\lambda=$

$2\ \mu\text{m}$ 的中红外波段,其 γ 也达到了 $79\ 157\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。而随着 R_1 的变大,纤芯的横截面变大,光会在纤芯中发散使得 A_{eff} 增大。 A_{eff} 与 γ 呈反比关系,当 A_{eff} 减小时, γ 增大,具体数值如表2所示。

表2 光纤性能

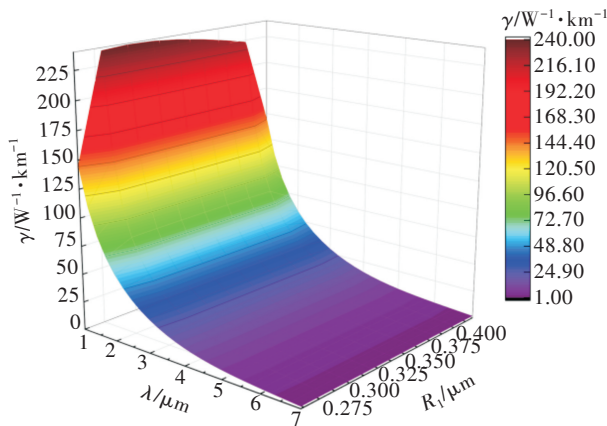
Table 2 The performance of the proposed fiber

工作波长/ μm	光纤参数 ($d_1=0.8\ \mu\text{m}, \Lambda=2.2\ \mu\text{m}, R_1=0.34\ \mu\text{m}, R_2=0.7\ \mu\text{m}$)			
	$D/\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	$L_c\times 10^{-8}/\text{dB}/\text{m}$	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	$\gamma/\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
1	-1 619.390	0.061	0.70	248 630
2	86.297	0.064	1.17	79 157
3	583.416	0.897	1.67	34 972
4	667.465	0.442	2.48	16 260
5	534.806	0.321	3.80	8 099
6	-1 224.910	0.452	5.91	3 832
7	-3 715.600	12.869	12.10	813



(a) 有效模场面积 A_{eff} 随波长 λ 的变化关系

(a) Relationship between effective mode field area A_{eff} and wavelength λ



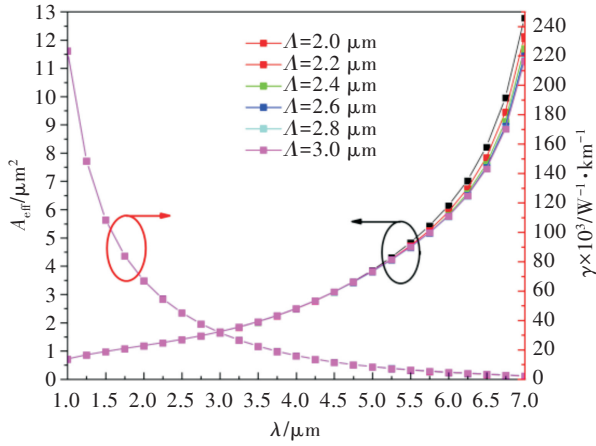
(b) 非线性系数 γ 随波长 λ 的变化关系

(b) Relationship between nonlinear coefficient γ and wavelength λ

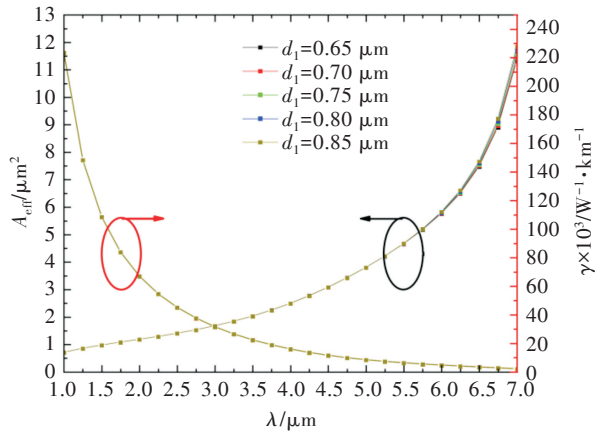
图4 不同纤芯半径的有效模场面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长 λ 的变化

Figure 4 Variation of effective mode field area A_{eff} and nonlinear coefficient γ with wavelength λ for different core radius

在PCF中,除了提高材料的非线性折射率系数(n_2)可以改变光纤的非线性效应外,改变空气孔包层的气孔半径与气孔间距也可以在一定程度上提高非线性系数,其原理就是更好地将光束束缚在纤芯部分,从而减小有效模场面积 A_{eff} 。图5(a)和图5(b)分别讨论了改变第1层气孔到纤芯之间的距离 Λ 和第1层气孔半径 d_1 时 A_{eff} 与非线性系数 γ 与波长 λ 的变化关系,在同一间距下,有效模场面积曲线和非线性系数曲线选择同一种颜色。由图5(a)和图5(b)可知,当改变 Λ 和 d_1 时,有效模场面积曲线和非线性系数曲线几乎重合,其原因是本文所设计的纤芯部分是将 As_2Se_3 硫系玻璃置于 SiO_2 基底的中心,两种材料的折射率差较大,纤芯周边材料均为背景材料 SiO_2 ,因此 SiO_2 对光场的限制作用要大于空气孔包层的限制作用,当改变空气孔的间距以及半径时对 A_{eff} 的影响非常小,模拟得到的数据表明,本文所设计的光纤纤芯能够在很大程度上提高光纤中的非线性效应。由于空气孔对非线性系数的影响较小,故可以在一定程度上改变空气孔的尺寸,使其成为适合机械钻孔工艺的最佳尺寸。除此之外,在光纤的制造过程中,难免会产生由于制造工艺的不足而造成的与理论设计上的差异,而当包层气孔尺寸对光纤的光学性能影响很小时,这些差异便能被忽略,这样便可以大幅度降低光纤在制造过程中所产生的缺陷损耗。



(a) 气孔间距从2.0变化到3.0 μm 时有效模场面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长 λ 的变化关系
 (a) The relationship between the effective mode area A_{eff} and the nonlinear coefficient γ with the wavelength λ when the pore spacing changes from 2.0 to 3.0 μm



(b) 气孔半径从0.65变化到0.85 μm 时有效模场面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长 λ 的变化关系
 (b) The dependence of the effective mode area A_{eff} and the nonlinear coefficient γ on the wavelength λ as the pore radius changes from 0.65 to 0.85 μm

图5 不同气孔间距和气孔半径下有效模场面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长 λ 的变化关系

Figure 5 Changes of effective mode field area A_{eff} and nonlinear coefficient γ with wavelength λ under different pore spacing and pore radius

2.4 光纤性能

通过上述优化过程,本文所提光纤的最终参数和光学性能如表2所示,该光纤在能实现平坦色散的同时,具有低限制损耗和高非线性特性。上述优化结果表明,该光纤色散、限制损耗以及非线性特性均与光纤的纤芯和低折射率环尺寸有关,其中低折射率环能有效提高光纤的光学性能。

表3所示为本文所设计光纤非线性(γ)、色散(D)以及限制损耗(L_c)与已有文献报导的参数的比较,由表可知,螺旋状 PCF 具有高非线性和高负色

散特性,并且与目前报道的文献对比可知,其具有更低的限制损耗,表明该纤芯结构的设计方式能够有效提高光纤的光学特性。由于当前光纤通信的主要研究方向是提高通信速率以及通信容量,需要宽谱光源,诸如超连续谱(Super Continuum, SC)光源^[24]。而色散特性作为光纤的固有特性之一,对于可以产生多零色散波长的光纤,选择零色散波长附近的泵浦脉冲可以产生宽谱的 SC^[25]。

表3 本工作与近期报道文献的对比

Table 3 Comparison between this work and the recent reported literature

参考年份	γ / $\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$	L_c /dB/m	D / $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$	零色散波长 /nm
In(2020) ^[23]	6 200	10^{-8}	0	1 550
In(2020) ^[17]	8 000	10^{-7}	50	1 000
In(2021) ^[26]	6 585	0.24	-260	3 900
In(2022) ^[27]	2.1×10^4	—	-200	2 000
本文	6.7×10^4	10^{-8}	-284	1 800, 4 100, 6 900

2.5 光纤的制造

常用的光纤制造方法为堆叠拉伸,但由于石英玻璃和硫系玻璃在物理特性上存在差异,常规的制备方法不适用于此类光纤的设计。2010年,Conu-lombier 等人^[28]提出了一种制造硫系玻璃光纤的新方法,使用 SiO_2 模具成功制备了 As_2Se_3 纤芯的嵌入式 PCF,并且能在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的波长范围内显著提高硫系玻璃光纤的传输性能。首先,利用化学气相沉积技术在 SiO_2 基底上生长光子晶体结构;然后,通过溶液法在光子晶体结构中填充硒化砷纤芯材料,并在其外部形成掺锗硒化砷材料作为低折射率环,最后,利用等离子刻蚀技术精确调控光子晶体的形貌和尺寸,确保光传输特性的优化。

光纤在制备时,会因制造时所带来的误差而对光纤的光学性能产生一定影响,通过分析光纤结构参数在 $\pm 20\%$ 之间的变化对光纤性能的影响,可以更有效地得知制备光纤时带来的误差对参数的影响,具体由表4给出。由于纤芯直径的偏差会直接影响纤芯的横截面积与模式分布,从而影响光纤的光学特性。通过分析纤芯半径(R_1)的变化与气孔间距(Λ)的变化对非线性系数(γ)以及限制损耗(L_c)的影响可知,当 R_1 和 Λ 在 $\pm 20\%$ 之间变化时, γ 的变化基本不会超过 1% ,并且由图5(b)可知,气孔半径对光纤非线性的影响很小,因此,该光纤在制造

时,可以在很高程度上减小制造光纤时的缺陷损耗。

表4 光纤的制造工差影响

Table 4 Analysis of manufacturing error of optical fibers

结构参数的变化量	纤芯半径变化的影响 ($d_1=0.8\ \mu\text{m}$, $\Delta=2.2\ \mu\text{m}$, $R_2=0.7\ \mu\text{m}$)				气孔间距变化的影响 ($d_1=0.8\ \mu\text{m}$, $R_1=0.34\ \mu\text{m}$, $R_2=0.7\ \mu\text{m}$)			
	$R_1/\mu\text{m}$	$L_c/\text{dB/m}$	$\gamma/\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	γ 的改变量(%)	$\Delta/\mu\text{m}$	$L_c/\text{dB/m}$	$\gamma/\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	γ 的改变量(%)
-20%	0.272	3.49	78.260	1.24	1.62	3.65	79.172	0.018
-10%	0.306	1.88	78.896	0.44	2.16	2.78	79.166	0.011
0	0.340	7.07	79.246	0	2.40	2.83	79.157	0
10%	0.374	2.49	78.901	0.43	2.64	3.11	79.146	0.013
20%	0.408	1.78	78.583	0.83	2.88	2.80	79.156	0.024

3 结束语

本文提出了一种低折射率环环绕 As_2Se_3 硫系玻璃纤芯的螺旋结构高非线性 PCF。使用有限元法在 $1\sim 7\ \mu\text{m}$ 的波长范围内进行了理论研究。通过改变纤芯尺寸和气孔尺寸着重分析了该光纤在中红外波段的限制损耗、色散以及非线性特性与其他光学参数之间的关系。该光纤提供的 $10^{-8}\ \text{dB/m}$ 数量级低限制损耗可以让高非线性光纤在光纤通信系统的传输和处理中保持高效率,并有助于提高系统的整体性能。除此之外,该光纤还具有多个零色散波长,且具有负色散和色散平坦的特性,这对于光通信系统当中的色散补偿和超短脉冲激光系统的设计具有重要意义。在保证单模传输的条件下,本文所设计光纤在 $\lambda=2\ \mu\text{m}$ 时具有 $1.17\ \mu\text{m}^2$ 的有效模场面积和 $79\ 157\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 的超高非线性系数,能够应用在激光器和超快光脉冲发生器等领域。该光纤在中红外光通信和光传感领域中有潜在的应用前景。

参考文献:

[1] Knight J C, Birks T A, Russell P S, et al. All-silica Single-mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.

[2] Chen D, Shen L. Ultrahigh Birefringent Photonic Crystal Fiber with Ultralow Confinement Loss [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(4): 185-187.

[3] Li X, Xu Z, Ling W, et al. Design of Highly Nonlinear Photonic Crystal Fibers with Flattened Chromatic Dispersion [J]. Applied Optics, 2014, 53(29): 6682-6687.

[4] Abdur Razzak S M, Namihira Y. Tailoring Dispersion and Confinement Losses of Photonic Crystal Fibers Using Hybrid Cladding[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(13): 1909-1914.

[5] Hitaishi V, Ashok N. Broadband Supercontinuum Generation Using Dispersion Engineered As_2Se_3 -GeAsSe-GeAsS Waveguide at 6 mm [J]. IEEE Access, 2023, 11: 12294-12302.

[6] Gu S, Sun W, Li M, et al. Highly Sensitive Plasmonic Refractive Index Sensor based on Dual D-shaped Photonic Crystal Fiber with Aluminum Nitride-silver Films[J]. Plasmonics, 2022, 17(3): 1129-1137.

[7] Akasaka Y, Palacharla P, Takasaka S, et al. Hybrid Amplification Approach towards Wideband Optical Communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(3): 815-821.

[8] Huang Y, Wang Y, Zhang L, et al. Tunable Electro-optical Modulator based on a Photonic Crystal Fiber Selectively Filled with Liquid Crystal [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(9): 1903-1908.

[9] Cheng T, Sun Y, Zhang F, et al. Numerical Demonstration of Mid-infrared Temperature Sensing by Soliton Self-frequency Shift in a Fluorotellurite Microstructured Fiber [J]. Applied Physics B, 2021, 127(12): 156.

[10] 杨松岩,何巍,张钰民,等.镀金表面光子晶体光纤温度传感特性仿真分析[J].光通信研究,2024(4): 230008.

[11] Yang S Y, He W, Zhang Y M, et al. Simulation Analysis of Temperature Sensing Characteristics of Photonic Crystal Fiber with Gold Plated Surface [J]. Study on Optical Communications, 2024(4): 230008.

[12] Eid M M A, Habib M A, Anower M S, et al. Highly Sensitive Nonlinear Photonic Crystal Fiber based Sensor for Chemical Sensing Applications [J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(3): 1007-1014.

[13] Smektala F, Brilland L, Chartier T, et al. Recent Advances in the Development of Holey Optical Fibers based on Sulphide Glasses [J]. Photonic Crystal Materials and Devices IV, 2006, 6128: 106-113.

[14] Dussauze M, Cardinal T. Nonlinear Optical Properties

- of Glass [M]//Springer Handbook of Glass. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2019: 193–225.
- [14] Savage J A, Nielsen S. Chalcogenide Glasses Transmitting in the Infrared between 1 and 20 μm State of the Art Review [J]. *Infrared Physics*, 1965, 5(4): 195–204.
- [15] Lenz G, Zimmermann J, Katsufuji T, et al. Large Kerr Effect in Bulk Se-based Chalcogenide Glasses [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(4): 254–256.
- [16] Fortier C, Fatome J, Pitois S, et al. Experimental Investigation of Brillouin and Raman Scattering in a Ge₁₅Sb₂₀Se₆₅ Microstructured Chalcogenide Fiber [C]//2008 34th European Conference on Optical Communication. Brussels, Belgium: IEEE, 2008: 4729397.
- [17] Mamtaz R, Ahmed K, Paul B K, et al. Design and FEM Analysis of Pentagonal Photonic Crystal Fiber for Highly Non-linear Applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(10): 455.
- [18] Du Z, He J, Wei F, et al. High Birefringence and Non-linear Photonic Crystal Fiber with Two Zero-dispersion Wavelengths [J]. *Indian Journal of Physics*, 2023, 97(4): 1235–1241.
- [19] Sanghera J S, Shaw L B, Pureza P, et al. Nonlinear Properties of Chalcogenide Glass Fibers [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2010, 1(3): 296–308.
- [20] Chen L, Chen F, Dai S, et al. Third-order Nonlinearity in Ge-Sb-Se Glasses at Mid-infrared Wavelengths [J]. *Materials Research Bulletin*, 2015, 70: 204–208.
- [21] Devika V, Rajan M S M. Hexagonal PCF of Honeycomb Lattice with High Birefringence and High Nonlinearity [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2020, 34(10): 2050094.
- [22] Hui Z, Wang X, Zhang Y, et al. Design of a Mid-infrared Ultra-broadband Chalcogenide Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅-based Single-polarization Single-mode Photonic Crystal Fiber with Large Nonlinearity [J]. *Optik*, 2019, 184: 50–62.
- [23] Kumar P, Fiaboe K F, Roy J S. Design of Nonlinear Photonic Crystal Fibers with Ultra-flattened Zero Dispersion for Supercontinuum Generation [J]. *ETRI Journal*, 2020, 42(2): 282–291.
- [24] Chen Y, Yamanaka M, Nishizawa N. Tunable Quasi-supercontinuum Generation in a 1.7 μm Spectral Band for Spectral Domain Optical Coherence Tomography [J]. *Optics Continuum*, 2023, 2(9): 1941.
- [25] Wei Q, Yuan J, Qin P, et al. Numerical Investigation of Efficient Mid-infrared Supercontinuum Generation and Cavity Soliton Generation based on Flattened Near-zero Dispersion Fiber [J]. *Laser Physics*, 2020, 30(8): 085105.
- [26] Hossain S, Shah S, Faisal M. Ultra-high Birefringent, Highly Nonlinear Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ Chalcogenide Glass Photonic Crystal Fiber with Zero Dispersion Wavelength for Mid-infrared Applications [J]. *Optik*, 2021, 225: 165753–165778.
- [27] Ahmad R. Mid-infrared Supercontinuum Generation in Liquid-filled Chalcogenide Suspended Core Fiber [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2022, 52: 101080.
- [28] Coulombier Q, Brilland L, Houizot P, et al. Casting Method for Producing Low-loss Chalcogenide Microstructured Optical Fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9107–9112.