

面向 OCT 应用的氮化硅波导基超宽带片上光源

惠战强^{1,2*}, 李佳颖^{1,2}, 李田甜^{1,2}, 韩冬冬^{1,2}, 巩稼民^{1,2}

(1. 西安市微波光子与光通信重点实验室, 西安 710121;

2. 西安邮电大学, 工程学院, 西安 710121)

摘要: 光学相干层析成像 (Optical Coherence Tomography, OCT) 技术具有非侵入、高分辨率、可实时成像等优点, 在生物医学、材料学及红外传感等众多领域被广泛应用。本文设计了一种基于氮化硅 (Si_3N_4) 的脊形悬空光波导, 基于时域有限差分法对所设计波导的主要结构参数进行了优化, 并研究了该波导中产生的超连续谱特性。数值模拟结果表明, 在脊宽=750nm、脊高=700nm、平板厚度=200nm 以及上覆层高=150nm 的优化结构下, 当入射泵浦光波长为 1.3 μm , 峰值功率为 2kW, 和脉宽为 50fs 时, 基于该光波导可以产生波长覆盖可见光至中红外 (703~4014nm) 的宽带超连续谱。这一结果对于促进片上集成宽带光源在生物医学等领域的应用具有重要作用。

关键词: 光学相干层析成像; 超连续谱; 氮化硅波导; 色散工程; 非线性效应

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Study of Silicon Nitride Waveguide-Based Ultra-Wideband On-Chip Light Source for OCT Applications

HUI Zhan-Qiang^{1,2*}, LI Jia-ying^{1,2}, LI Tian-Tian^{1,2}, HAN Dong-Dong^{1,2}, GONG Jia-Min^{1,2}

(1. Xi'an Key Laboratory of Microwave Photonics and Optical Communication, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, 710121, China;

2. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, 710121, China)

Abstract: Optical coherence tomography (OCT) technology has the advantages of non-invasive, high-resolution, and real-time imaging, which is widely used in various fields such as biomedicine, material science and infrared sensing. In this paper, a ridge suspended optical waveguide based on silicon nitride (Si_3N_4) is proposed. The structural parameters of the designed waveguide were optimized by using finite difference time domain (FDTD) method. The characteristics of the supercontinuum spectrum generated in the optimized waveguide were investigated. The simulation results show that for the optimized optical waveguide structure with ridge width of 750nm, ridge height of 700nm, plate thickness of 200nm, and upper layer height of 150nm, when a pump light with wavelength of 1.3 μm , peak power of 2kW and pulse width of 50fs was injected into the waveguide, a broadband supercontinuum spectrum with wavelength covering the visible to the mid-infrared region (703~4014nm) can be generated. This work plays an important role in promoting the application of on-chip integrated broadband light source in biomedical imaging and related fields.

Key words: Optical coherence tomography, Supercontinuum, Si_3N_4 waveguide, Dispersion engineering, Nonlinear optics effect

PACS:

引言

超连续谱 (Supercontinuum, SC)^[1-2] 是一种特殊光源, 指高峰值功率超短脉冲在非线性光学介质中

传输时, 发生一系列非线性光学效应并产生新的频率成分, 导致输出光谱发生极大展宽而形成的宽带光谱。作为一种兼具高亮度和高相干性的宽谱光

基金项目: 国家自然科学基金 (61875165); 陕西省重点研发计划项目 (2022GY-008); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2022JQ-638); 陕西省创新能力支撑计划项目 (2022PT-15); 陕西省教育厅协同创新项目 (20JY060)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61875165); the Key Research and Development Program Projects of Shaanxi Province (2022GY-008); the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2022JQ-638); the Shaanxi Provincial Innovation Capability Support Program Project (2022PT-15), and the Collaborative Innovation Projects of Education Office of Shaanxi Province (20JY060)

作者简介 (Biography): 惠战强 (1978-), 男, 陕西渭南人, 博士, 教授, 主要研究领域为光纤通信与微纳光子器件。

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

源,其被广泛应用于光通信^[3-4]、光传感^[5]、光学频率精确测量^[6]、荧光显微镜^[7]、非接触粗糙度检测^[8]以及光学相干层析成像^[9]等领域。其中,OCT是一种非侵入和高分辨率的实时光学成像技术,在生物学、材料检测及红外传感等诸多领域呈现出诱人的应用前景。传统的OCT系统所用光源采用发光二极管,若用SC光源替代发光二极管,基于SC光源特有的发射特性(光束质量、空间相干性、单向性)以及高光谱亮度、稳定性和超宽带光谱覆盖范围^[10-11]等特性,可将现有OCT系统成像分辨率提高1~2个数量级(提高到1~15 μm)。2002年,Andrew将一个覆盖697~835nm的SC光源用作OCT光源,对非洲爪蟾体内的蝌蚪成像,实现了<2 μm 的轴向分辨率和5 μm 的横向分辨率^[12]。2020年,Andreas团队使用覆盖650~950nm波段的SC光源,对猪和灵长类动物食蟹猴的角膜形态微观结构进行成像,得到了1.5 μm ×1.5 μm ×1 μm 的最高分辨率^[13],极大推动了该领域的技术进步。但是,上述研究所采用的SC光源体积较大,使得OCT设备复杂笨重,而微型化手持式OCT将会对医学检测带来极大便利。

另一方面,当前硅基光电子学迅速发展,光子集成平台日趋成熟,各种功能新颖的高性能片上光子集成器件不断涌现,在此背景下,研发一种高性能片上集成宽带SC光源,对于提高现有OCT设备性能、缩小体积/重量、降低功耗具有重要意义。当前片上光源主要分三种途径实现^[14]:(1)制备硅基发光材料(如稀土离子掺杂硅基光源)^[15-17]。然而由于稀土元素在单晶硅中的固溶度很低,在以硅原子为主的基质中稀土离子难以获得合适的晶体场环境以实现高效发光,存在增益较小,损耗过大、材料制备难度高等弊端。(2)通过键合或外延工艺在硅片上集成Ⅲ-V族化合物半导体^[18-19]。然而,该技术面临着硅基底与Ⅲ-V族外延材料二者的晶格常数和热膨胀系数存在差异这一现实,前者导致材料与硅界面间严重的晶格失配,引入位错、反相畴等缺陷,严重限制了Ⅲ-V族硅基光源的寿命与性能。后者则直接导致工作过程中光源对外界环境温度的敏感,限制了Ⅲ-V族硅基光源的应用场景与稳定性。(3)研发硅基Ⅳ族光源^[20-22]。Ⅳ族光源主要包括多孔硅、硅量子点、硅锗超晶格等体系。该方案面临的主要挑战是Ⅳ族半导体材料多为间接带隙,导致其激子辐射复合寿命长,发光效率比直接带隙的低4~5个量级。(4)外置激光光源,当外置单波长激光

器时,其无法满足片上大规模集成的目标,但可以通过外置短脉冲锁模激光器,用超短脉冲对非线性光波导(如Si、Si₃N₄、硫化物等)进行泵浦,实现片上超连续谱^[23-25]。

Si₃N₄是光子集成领域一种很有应用前景的芯片材料,其折射率介于二氧化硅和硅之间,具有较大的能带间隙、高的非线性系数、极宽的光学透明窗口(覆盖可见光至中红外波段)、良好的材料稳定性,以及可忽略的双光子吸收(Two-photon Absorption, TPA)效应,并且与CMOS工艺兼容^[26-27],使其在光子集成领域呈现出诱人的应用前景^[28]。截止目前,基于Si₃N₄波导,人们已经研制出各种性能优异的光子集成器件,例如偏振分束旋转器^[29]、波分复用器^[30]、光栅耦合器^[31-32]、全光波长转换器^[33-34]、光频率梳^[35]以及SC光源^[36-42]。但是,前期研究表明,由于不同的生物组织对光波具有不同的吸收峰,当利用SC光源结合OCT技术对视网膜(800~900nm)^[36-37]、牙齿、神经(1600~1800nm)^[38-40]和血管(1000~1350nm)^[41-42]等不同对象成像时,为实现最佳成像效果,需要可覆盖不同波长范围的SC光源。例如,2015年,Zhao团队将中心波长为795nm、峰值功率为874W、脉宽为100fs的脉冲注入Si₃N₄波导,在片上实现了覆盖488~978nm波段的SC,并将其用于生物视网膜成像^[36]。2016年,日本Masahito Yamanaka团队报道了中心波长为1578nm、峰值功率为51mW,实现波长覆盖1479~1651nm的SC,对猪甲状腺中的卵泡,肠粘膜结构和狗牙的内部结构实现了清晰成像^[38]。同年,该组采用波长覆盖1730nm、平均输出功率为30mW,实现覆盖1530~1910nm的SC用于小鼠大脑成像^[39]。2019年,Nori-hiko Nishizawa团队采用中心波长为1700nm、脉宽为100fs以及平均输出功率为60mW,实现覆盖780~903nm的SC用于小鼠脑神经精确成像^[42]。而对于前房成像研究表明,相对合适的光源波长是1300nm^[43-46]。例如,2001年,Hartl等人使用带宽为370nm、中心波长在1300nm的SC作为OCT光源,对仓鼠颊袋进行成像,在空气及组织中获得的纵向分辨率分别为2.5mm和2mm^[43]。2011年,Khanh等人使用带宽为500nm、中心波长在1300nm的SC作为OCT光源,对小鼠耳组织进行成像,在空气及组织中得到纵向分辨率分别为8 μm 和2 μm ^[44]。2015年,Ratheesh等人在1320nm中心波长下使用宽使用带宽为100nm、中心波长在1320nm的SC作为OCT光

源,对指甲皮肤和猪眼睛的虹膜角膜角进行成像,在空气及组织中分别实现了 $8.7\mu\text{m}$ 和 $6.4\mu\text{m}$ 的纵向分辨率^[45]。2021 年, Ji 等人使用带宽为 105nm 、中心波长在 1300nm 的 SC 作为 OCT 光源,对人体乳房组织进行成像,在空气及组织中分别实现了 $7.45\mu\text{m}$ 和 $4.97\mu\text{m}$ 的纵向分辨率^[46]。然而在该波段可用的集成化片上 SC 光源相对较少,因此研制覆盖该波段的片上 SC 光源,对于提高生物前房成像分辨率、缩小现有 OCT 光源设备体积、促进生物医学技术进步有着重要意义。

本文设计了一种面向 OCT 应用的色散剪裁脊形悬空 Si_3N_4 光波导,通过优化波导结构参数,实现了对波导色散、有效模场面积和非线性系数的有效调控。通过注入中心波长为 1300nm 的超短光脉冲进行泵浦,在波导输出端得到覆盖可见光至中红外波段, -50dB 带宽约为 3300nm 的 SC,并系统研究了 SC 谱特性与泵浦参数、波导长度之间的关系,分析了所产生 SC 的相干性。所设计的片上 SC 光源在基于 OCT 的生物医学成像领域具有潜在的应用价值。

1 波导结构设计和制作

所提出的脊形悬空 Si_3N_4 波导的横截面如图 1(a) 所示,图 1(b) 为其三维图。白色部分代表空气,黑色部分代表硅 (Si),红色部分代表二氧化硅 (SiO_2),蓝色部分代表 Si_3N_4 。整个波导由衬底 Si 层和 SiO_2 层、中间平板层、脊型 Si_3N_4 层和上覆 SiO_2 层四部分组成,其中,中间平板层和脊形 Si_3N_4 层合称为 Si_3N_4 芯层。波导的几何尺寸如图 1(a) 所示,其中 Si_3N_4 的刻蚀深度为 H ,脊宽为 W ,平板厚为 h_2 ; SiO_2 上覆层高为 h_1 。该波导的制作流程为:先在 SOI 衬底上运用等离子增强化学气相沉积法 (Plasma En-

hanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 沉积一层 Si_3N_4 ^[47],然后采用湿法刻蚀技术,形成脊型 Si_3N_4 波导芯,接着采用低压化学气相沉积法生长一层 SiO_2 ,形成上覆盖层。最后,为了避免中间层 SiO_2 对光波的吸收,通过湿法蚀刻去除掩埋的 SiO_2 以形成悬浮结构。

色度色散是光波导的一个重要光学参数,包括材料色散和波导色散,可由以下公式决定^[48]:

$$D = -\left(\frac{\lambda}{c}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2}\right) \quad (1)$$

其中 n_{eff} 是波导的有效折射率系数, λ 和 c 分别是光在真空中的波长和速度。材料色散由材料自身决定,不会随波导结构发生变化。一般使用 Sellmeier 方程来表征, Si_3N_4 的 Sellmeier 方程如下式^[49]:

$$n^2 - 1 = \frac{3.0249\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1353406^2} + \frac{40314^2}{\lambda^2 - 1239.842^2} \quad (2)$$

SiO_2 的 Sellmeier 方程表示如下^[50-52]:

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.06840443^2} + \frac{0.4079426^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794}{\lambda^2 - 9.896161^2} \quad (3)$$

2 波导结构优化

波导的色度色散特性对实现平坦宽带的 SC 有至关重要的影响,色度色散的重要来源之一是波导色散,其与波导的结构参数密切相关,因此,为了高效产生覆盖目标波段的 SC 谱,需要设计的波导具有合理的色散特性。基于这一点,下文将逐一分析波导结构参数变化对其色度色散的影响,最终优化得到一个宽带且相对平坦的低色散区。此处采用基于时域有限差分法的软件 Lumerical MODE,结合控制变量法,对波导的色散进行数值分析,为确保仿

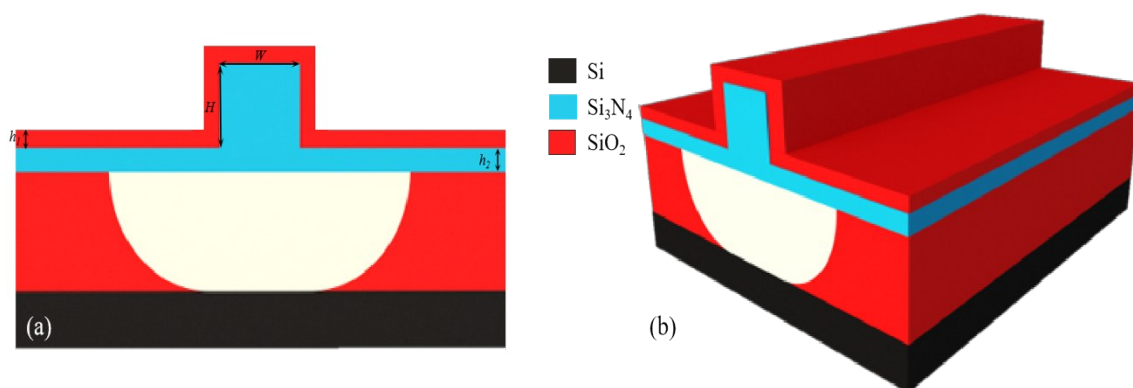


图 1 (a)脊形悬空 Si_3N_4 波导截面图; (b) 3D 图

Fig. 1 (a) Cross-section of ridge overhanging Si_3N_4 waveguide; (b) 3D plot

真精度,模拟区域设置为 $3 \times 3 \mu\text{m}^2$, 网格精度为 200×200 。

首先,分别分析平板厚度 h_2 和上包层厚度 h_1 变化对波导色散的影响。仿真中,设置 $W=750\text{nm}$ 、 $H=500\text{nm}$ 、 $h_1=200\text{nm}$ 固定不变。调节 h_2 在 $0 \sim 250\text{nm}$ 变化,得到结果如图 2(a) 所示。图中显示了在 $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长范围内,色散随 h_2 和波长的变化规律,不同颜色代表波导色散值不同,其中黑线代表零色散点。可以看出,随着 h_2 增大,两个零色散点逐渐向中心靠拢,原因在于较大的 h_2 导致模场能量从中心向平板层移动,光波导对模式限制能力变弱,因此发生能量泄露。同理,调节 h_1 在 $0 \sim 250\text{nm}$ 区间变化,设置其它参数分别固定为 $W=750\text{nm}$ 、 $H=500\text{nm}$ 、 $h_2=200\text{nm}$, 得到结果如图 2(b) 所示。由图可知,在波长 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 附近,波导色散近零,色度变化均匀,表明色散值平坦度也较好。综合考虑图 2(a) 和 2(b) 中波导色散值的变化趋势,为了得到宽带平坦且较低的反常色散区,选取 $h_1=150\text{nm}$ 、 $h_2=200\text{nm}$ 。

其次,分析脊高 H 对波导色散的影响,仿真中固定 $W=750\text{nm}$ 、 $h_1=150\text{nm}$ 、 $h_2=200\text{nm}$, 设置 H 变化范围为 $450 \sim 700\text{nm}$, 波长变化范围为 $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 得到波导色散随二者的变化关系如图 2(c) 所示。由图可知,随着 H 的增加,零色散点向两侧分散,色散曲线也变得不平坦。当 $H=500\text{nm}$ 时,波长 1300nm 处于反常色散区且色散曲线近零、色度变化均匀,表明色散值平坦度较好,故综合考虑选择 $H=500\text{nm}$ 。同理,分析脊宽 W 对波导色散的影响。仿真中调整 W 在 $650 \sim 900\text{nm}$ 区间变化,得到结果如图 2(d) 所示。由图可知,在波长 $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围内, W 对零色散点的影响与 H 的影响趋势大致相同,当波长大于 $1.55 \mu\text{m}$ 时,随着 W 的逐渐增加,零色散点向长波长方向移动。短波长处的零色散点基本稳定在 $0.9 \mu\text{m}$ 附近,且呈现较小变化。因为设计目标是产生覆盖 1300nm 的 SC, 因此选择 1300nm 为泵浦波长,由图 2(d) 可知,该波长处于反常色散区。同时,考虑到产生 SC 需要在 1300nm 附近较大波长范围内色散低且平坦,以及现有制造工艺的可行性,最终选择 $W=750\text{nm}$ 。

通过上述分析波导结构参数对色度色散的影响,可以看出,波导脊高 H 、脊宽 W 对波导的色散影响相对较大,原因在于 H 和 W 的变化导致波导中 TE 模式的有效模场面积发生较大变化,同时该模式的

有效折射率也产生较大影响,直接引起波导色度色散的变化。因此,为实现波长覆盖范围满足要求的 SC, 最终选择波导结构参数为: $W=750\text{nm}$ 、 $H=500\text{nm}$ 、 $h_1=150\text{nm}$ 、 $h_2=200\text{nm}$ 。此时,在 $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长区间内,有两个零色散点,色散变化范围为 $-984.8 \sim +161.32\text{ps/nm/km}$; 其中,短波长侧的零色散波长为 $0.925 \mu\text{m}$, 长波长侧的零色散波长为 $1.51 \mu\text{m}$ 。

在超连续谱产生过程中,除了色度色散对非线性光学效应有影响外,非线性系数 γ 同样对非线性光学过程有着重要影响。一般来讲,光波导的非线性系数可用以下公式表述^[53-54]:

$$\gamma(\omega_0) = \frac{\omega_0 n_2}{c A_{\text{eff}}} \quad (4)$$

其中, ω_0 为光波在真空中的角频率, n_2 为克尔系数 ($n_{2_{\text{Si}_3\text{N}_4}} = 2.4 \times 10^{-19} \text{m}^2/\text{W}$, $n_{2_{\text{SiO}_2}} = 2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$)^[55], c 是真空中的光速, A_{eff} 为有效模场面积,可以表述为^[56]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^4 dx dy} \quad (5)$$

式中 $F(x,y)$ 是 TE 模的矢量电场。对于优化后的光波导,在关注的波长范围 $0.6 \sim 2 \mu\text{m}$ 内,其有效模场面积 A_{eff} 与非线性系数随波长的变化如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可知, γ 与 A_{eff} 成反比, A_{eff} 随着波长增加而变大,而 γ 会随波长增加而变小,这是因为随着波长增加,导模光功率分布区域从 Si_3N_4 中心层移动到上覆 SiO_2 层和衬底区域。其中,在 $0.6 \mu\text{m}$ 处,有效模场面积最小,为 $0.352 \mu\text{m}^2$, 对应的非线性系数最大,为 $7.395 \text{W}^{-1} \text{m}^{-1}$ 。图 3(b) 为所设计脊型光波导在零色散波长 $0.925 \mu\text{m}$ 和 $1.51 \mu\text{m}$ 处的 TE 模场分布图。可以看出,脊形悬空波导可以很好的将光场限制在 Si_3N_4 波导芯内。

3 超连续谱特性分析

当高峰值功率激光在非线性光波导中传输时,由于自相位调制(Self-phase Modulation, SPM)、交叉相位调制(Cross-phase Modulation, XPM)、四波混频(Four-wave Mixing, FWM)、受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)等多种非线性光学效应同时发生,导致在光谱上会产生许多新的频率分量,输出光谱相对输入光谱发生极大展宽,形成 SC。光波导中产生 SC 的过程可以使用广义非线性薛定谔方程(Generalized Nonlinear Schrodinger Equation,

GNLSE)来描述^[57]:

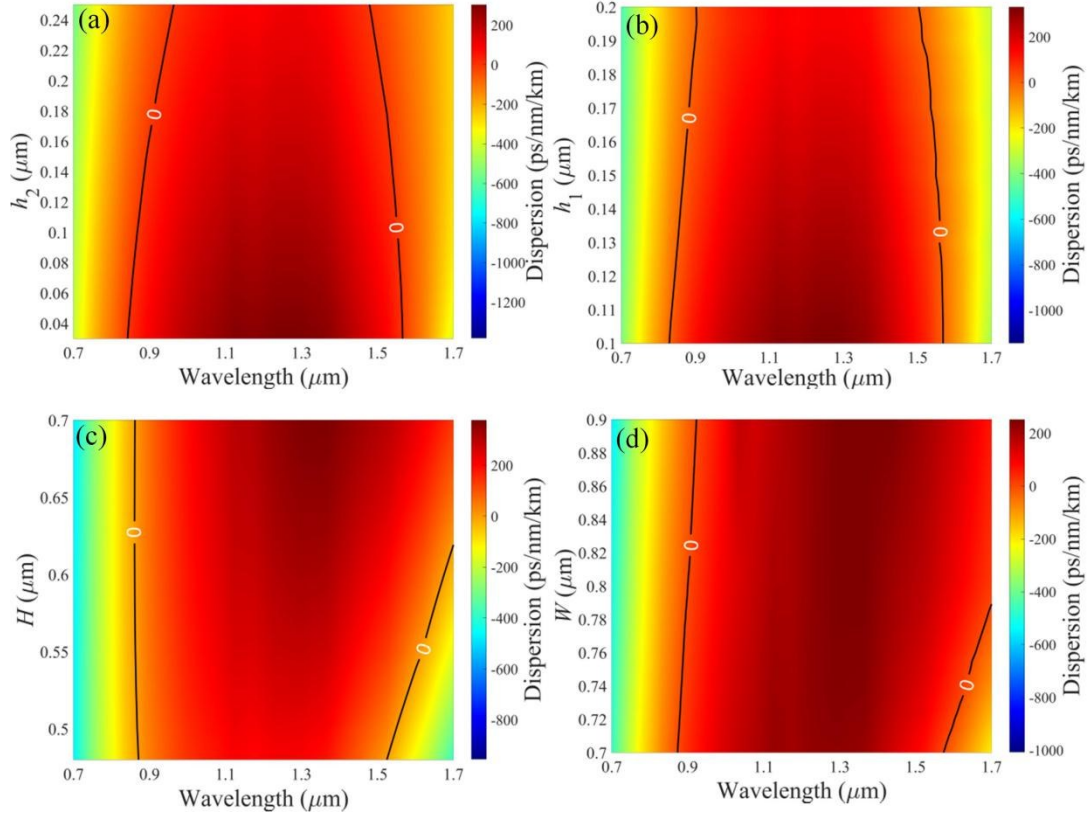


图2 不同波导结构参数:(a) h_2 ;(b) h_1 ;(c) H ;(d) W 和波长变化对波导色散的共同影响

Fig. 2 Combined effect of different waveguide structural parameters: (a) h_2 ; (b) h_1 ; (c) H ; (d) W and wavelength variation on waveguide dispersion

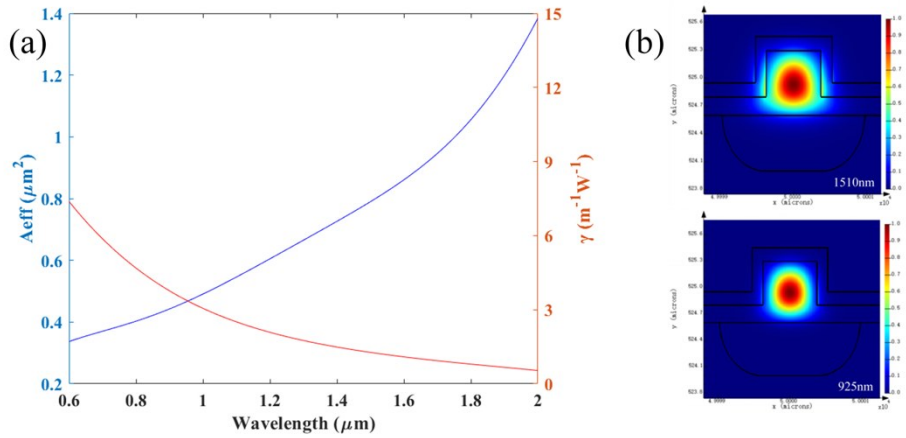


图3 (a)波导有效模场面积、非线性系数随波长的变化;(b)1510nm和925nm处TE模场能量分布图

Fig. 3 (a) The relationship of effective mode field area and nonlinear coefficient of waveguide versus wavelength; (b) Energy distribution of TE mode field at 1510nm and 925nm.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} A(z, T) = & -\frac{\alpha}{2} A + \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} \beta_k \frac{\partial^k A}{\partial T^k} + i \left(\gamma + \frac{\partial_2}{2A_{eff}} \right) \left(1 + \frac{i}{\varpi_0} \frac{\partial}{\partial T} \right) \times \\ & \left(A(z, T) \int_{-\infty}^{\infty} R(T) |A(z, -T')|^2 dT' \right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, α 是波导的线性传播损耗, β_k 是在输入脉冲的中心频率 ω_0 处的 k 阶色散系数, γ 表示介质的非线性系数。其中 $R(t) = (1 - f_R)\delta(t) + f_R h_R(t)$ 为拉曼响应函数(系数 f_R 代表拉曼对非线性极化的小数部分贡献)。该方程可以使用四阶龙格-库塔法和分步傅立叶方法相结合进行数值求解。

数值分析过程中, 根据优化波导的色散曲线, 设置泵浦光中心波长为 1300nm, 此波长对应的有效模场面积 A_{eff} 为 $0.658346\mu\text{m}^2$ 、非线性系数 γ 为 $2.196\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$, 同时忽略波导线性损耗。为了确保数值分析精度, 计算中取到 10 阶色散($\beta_1=7081\text{ps}/\text{m}$ 、 $\beta_2=-0.1162\text{ps}^2/\text{m}$ 、 $\beta_3=0.0003278\text{ps}^3/\text{m}$ 、 $\beta_4=-4.957\times 10^{-6}\text{ps}^4/\text{m}$ 、 $\beta_5=3.661\times 10^{-8}\text{ps}^5/\text{m}$ 、 $\beta_6=2.669\times 10^{-10}\text{ps}^6/\text{m}$ 、 $\beta_7=-2986\times 10^{-11}\text{ps}^7/\text{m}$ 、 $\beta_8=1.041\times 10^{-13}\text{ps}^8/\text{m}$ 、 $\beta_9=-1.906\times 10^{-14}\text{ps}^9/\text{m}$ 、 $\beta_{10}=4.597\times 10^{-15}\text{ps}^{10}/\text{m}$)。在 1300nm 处 $\beta_2<0$, $\beta_3>0$ 。根据超连续谱的形成机制, 当输入脉冲的中心波长处于波导反常色散区并接近零色散点时, 才能高效地发生简并 FWM 过程, 导致光谱极大展宽。接下来将详细分析波导长度、泵浦脉冲峰值功率和脉冲宽度对光谱展宽的影响, 最后分析了产生的 SC 的相干性。

3.1 波导长度对 SC 的影响

首先分析波导长度 L 对 SC 特性的影响。数值分析中设置泵浦光中心波长为 1300nm, 峰值功率为 0.5kW, 脉冲宽度为 50fs, 改变波导长度从 1mm 到 10mm, 计算波导长度变化对 SC 的影响。得到 SC 的光谱和时域脉冲随波导长度的变化情况分别如图 4(a) 和 (b) 所示。

图 4(a) 显示了泵浦光脉冲经过不同波导长度后对应的输入输出光谱, 可见, 随着波导长度的增加, 输出光谱逐渐展宽。由图可知, 当 $L\leq 3\text{mm}$ 时, 展宽的光谱关于中心波长对称, 原因在于此时脉冲在波导中的传输距离较短, 非线性效应以自相位调制为主, 因此获得了较小幅度的初始光谱展宽, 展宽范围为 1227~1734nm。当 $L\geq 4\text{mm}$ 时, 可以看到光谱明显进一步展宽, 原因在于随着波导长度增加, 在高阶非线性效应和高阶色散的共同作用下, 高阶孤子分裂成若干个基阶孤子, SRS 引起的孤子自频移效应使得基阶孤子向长波长方向红移, 同时当满足相位匹配条件时孤子会将能量转移至长波长区间, 形成色散波, 孤子和色散波共同作用使光谱得到进一步展宽。当 $L\geq 8\text{mm}$ 以后, 光谱获得了极大的展宽, 此时, XPM、FWM 和 SRS 均得到充分激发, 孤子

分裂数目增多。如果继续增加波导长度, 输出的光谱不会再随着波导长度的增加而发生明显变化。可以看到, 最终在波导长度为 10mm 处, 得到 -50 dB 带宽为 1270nm (覆盖 794~2564nm) 的非对称宽带 SC。相应光谱随波导长度的演化如图 4(c) 所示。

图 4(b) 为不同波导长度下对应的时域脉冲, 显然, 当 $L<4\text{mm}$ 时, 脉冲宽度没有发生明显变化, 因为该阶段波导长度过短。根据孤子分裂条件^[58]: $L_{fss}\sim L_D/N = \sqrt{L_D L_{NL}} = T_0 / \sqrt{|\beta_2| \gamma P_0}$ 计算可得到, 发生孤子分裂时对应的波导约为 4mm, 当 $L\geq 4\text{mm}$ 时, 在高阶色散和非线性效应的共同作用下, 高阶孤子分裂为多个基阶孤子。当 $L\geq 6\text{mm}$ 时, 长波长处产生更多的光谱分量。对应时域脉冲沿波导长度的演化如图 (d) 所示。因此, 综合考虑, 选择波导长度为 10mm。

3.2 脉冲峰值功率对 SC 的影响

其次, 分析脉冲峰值功率对产生 SC 特性的影响, 分析中, 固定波导长度为 10mm, 泵浦脉冲脉宽为 50fs, 分别设置峰值功率为 0.1kW、0.5kW、1kW 和 2kW, 得到不同峰值功率下波导初始输入光谱和经波导传输后的输出光谱如图 5(a) 所示, 对应的光谱沿波导长度演化趋势如图 5(b) 所示。从图 5(a) 可以看出, 当脉冲峰值功率为 0.1kW 时, 得到 -50 dB 带宽覆盖 1213nm 到 1434nm 的 SC 光谱, 脉冲峰值功率为 0.5kW 时, 得到 -50 dB 带宽覆盖 794nm 到 2564nm 的 SC 光谱, 脉冲峰值功率为 1kW 时, 得到 -50 dB 带宽覆盖 717nm 到 3234nm 的 SC 光谱, 峰值功率为 2kW 时得到 -50 dB 带宽从 703 到 4014nm 的 SC 光谱。随着峰值功率的不断增大, 输出光谱的宽度也在不断增加且趋于平坦化。在更高的峰值功率下, SPM 会被加强, 产生更多新频率分量, 因此在 SC 中心波长附近, 可以观察到更明显的光谱幅值起伏波动。从图 5(b) 可以明显看出, 随着入射光峰值功率的增大, 光谱沿长波长方向展宽。当峰值功率为 0.1kW 时, SPM 效应仅使得光谱发生有限展宽; 当峰值功率大于 0.5kW 后, 光谱迅速展宽。这是由于峰值功率的增加导致各种光学非线性效应同时加强, 更多的能量转移到了长波段, 光谱更容易展宽。随着峰值功率的继续增大, 光谱的展宽速度明显下降, 这是由于展宽的光谱已经远离零色散波长, 从而降低了展宽的效率。

相应的在波导输入输出端, 时域脉冲波形随泵浦光峰值功率的变化如图 5(c) 所示, 随着峰值功率

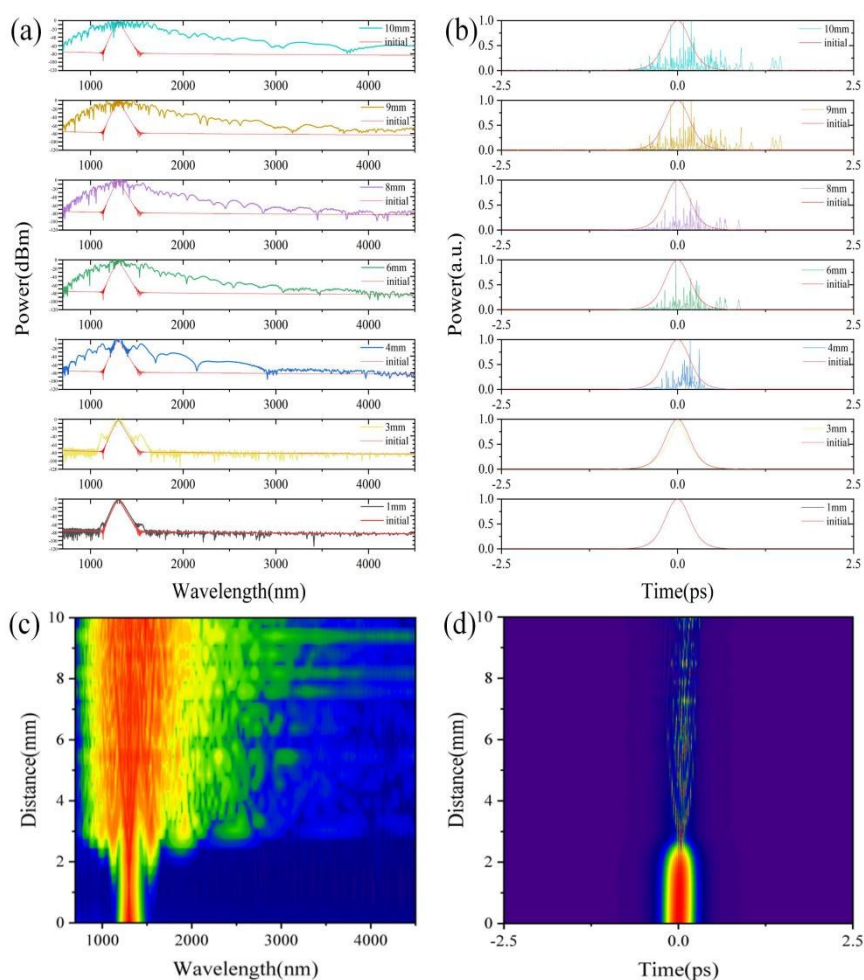


图4 不同波导长度下的(a)输入输出光谱和(b)输入输出时域脉冲波形;(c)光谱随传播长度演变;(d)时域脉冲随传播长度演变

Fig. 4 (a) input-output spectra and (b) input-output time-domain pulse wave forms for different waveguide lengths; (c) spectra evolution with propagation length; (d) time-domain pulse evolution with propagation length

增大,由于高阶非线性和高阶色散的影响,且中心波长附近的谱峰与高阶孤子裂变过程中引起的色散波有关。基于动量守恒定律^[59-60],可以准确地预测色散波的中心波长。图5(d)分别为不同泵浦光峰值功率下,时域脉冲沿波导长度的演化,可以看出,随着峰值功率增加,传输更短的距离就会出现孤子分裂,这与图5(c)相对应。随着峰值功率进一步增加时,由于GVD和自陡峭效应(Self-steepening, SS)的影响,光谱对称性进一步降低。特别是SC从反常色散区域延伸到正常色散区域(向左延伸到较短的波长和向右延伸到中红外长波长)。

4.3 脉冲宽度对SC的影响

接着,分析泵浦脉冲宽度对SC的影响,仿真中设定脉冲峰值功率为0.5kW,波导长度10mm,分别设置泵浦脉宽为25fs、50fs、100fs和200fs。图6(a)

显示了所提出的波导在不同宽度脉冲泵浦时得到的SC。由图可知,当脉冲宽度为25fs时,得到-50dB带宽覆盖从825到2515nm的SC光谱;脉冲宽度为50fs时,得到-50dB带宽覆盖从794到2564nm的SC光谱;脉冲宽度为100fs时,得到-50dB带宽覆盖从710到3473nm的SC光谱;脉冲宽度为200fs时,得到-50dB带宽覆盖从711到3791nm的SC光谱。对比发现,在传播的初始阶段,脉冲的能量很小,SPM效应在光谱展宽过程中发挥主要作用,光谱的展宽程度较小,光谱强度也较低。另一方面,当脉冲宽度逐渐加宽时,孤子能以更高阶的形式存在,从而分裂得到的不同频率的基阶孤子也随之增多,因此增强了色散波的产生,光谱的展宽程度由此加剧。随着脉冲宽度的不断增加(100fs以后),使光谱发生展宽的难度增大,这是由于当泵浦光中心波长

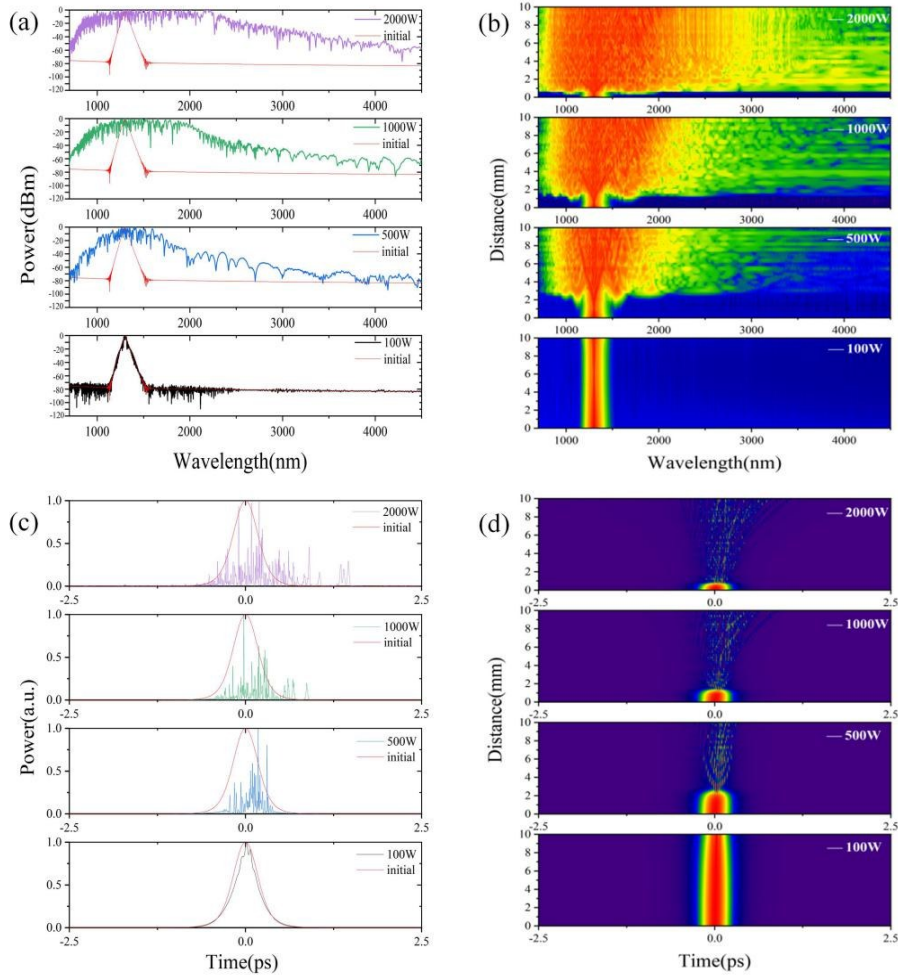


图5 峰值功率为0.1kW、0.5kW、1kW、2kW时(a)输入输出光谱随峰值功率演变;(b)光谱随传播长度演变;(c)输入输出时域脉冲波形随峰值功率演变;(d)时域脉冲随传播长度演变

Fig. 5 (a) input-output spectral evolution with peak power, (b) Spectral evolution with propagation length, (c) input-output time-domain pulse waveform evolution with peak power, and (d) Time-domain pulse evolution with propagation length for peak powers of 0.1kW, 0.5kW, 1kW, and 2kW

处于波导的反常色散区时,孤子的阶数 N 、色散长度 L_D 都会随着脉冲宽度 T_0 的增大而增大,此时孤子分裂所需要的传播长度已经超过波导长度(波导长度为固定值),导致无法通过孤子分裂进一步实现光谱展宽,使得光谱展宽的程度有限。如图6(b)所示,输入宽脉宽的初始输入脉冲经过波导后得到更宽且平坦的SC输出。总之,在相同的峰值功率下,在一定的脉宽变化范围内,脉宽较宽的泵浦脉冲产生了更宽的超连续光谱。

同时,如图6(c)所示,时域脉冲在SPM和GVD的共同作用下,在波导内传播一定距离后形成了高阶孤子。孤子阶数随着脉冲宽度的增加而增大,高阶孤子在三阶及更高阶色散影响下迅速分裂为基态孤子,脉冲时域表现出更加不对称。反常色散区

中的能量通过色散波转移到更长的波长,这可以从时域脉冲随传播距离的演变中看出。图6(d)为时域脉冲沿传播长度演变,可以发现随着传播距离的进一步增加,在光孤子自频移效应和SRS的辅助下,时域脉冲在传输一定距离后表现为中心不对称的多个脉冲。

4.4 SC的相干性

在OCT中,光源带宽决定系统测量的轴向分辨率^[61],而光源相干度则会影响到其信噪比^[62];在光脉冲压缩方面^[63],SC相干性的好坏直接影响到脉冲压缩比大小;噪声的引入也会降低非线性显微镜的分辨率^[64],因此获得高相干度的超连续谱尤为重要。因此,分别计算了当峰值泵浦光功率为0.5kW、1kW和2kW时对应的SC的相干性,得到结果如图7(a)。

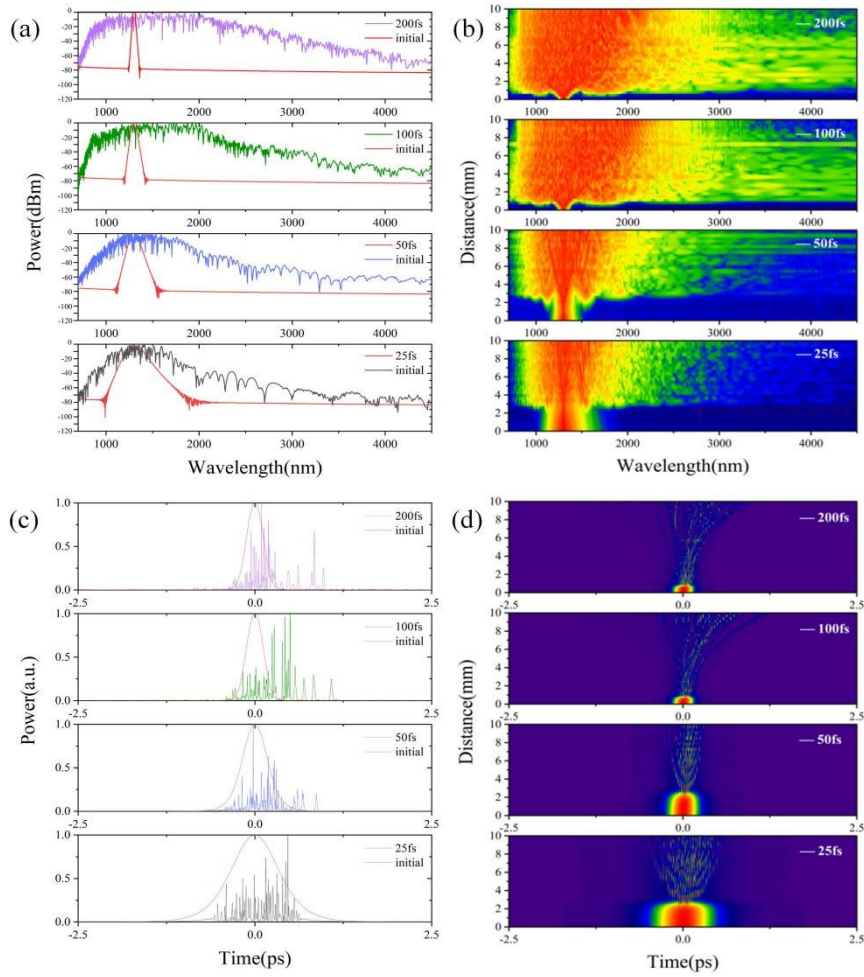


图6 脉冲宽度为25fs、50fs、100fs、200fs时(a)不同泵浦脉宽时的输入输出光谱(b)光谱随传播长度演变;(c)输入输出时域脉冲波形随脉冲宽度演变;(d)时域脉冲随传播长度演变

Fig. 6 Evolution of (a) input-output spectra for different pulse width; (b) spectra with propagation length; (c) input-output time-domain pulse wave forms with pulse width; (d) time-domain pulses with propagation length for pulse widths of 25fs, 50fs, 100fs, 200fs

数值分析中设置泵浦光中心波长为1300nm,氮化硅脊形悬空光波导长度为3mm,脉冲宽度为50fs。由图可知,随着泵浦光脉冲峰值功率的不断增大,SC的相干性明显下降。具体来看,当峰值功率为0.5kW时,在所分析的光谱范围内SC都具有较高的相干性;当峰值功率为1kW时,整个光谱只在中心波长处相干性较高;当峰值功率为2kW时,相干性整体较低。原因在于随着泵浦功率增加,除了SPM以外的其它非线性效应(如调制不稳定等)开始发挥作用,这些均导致了相干度的下降。

另一方面,分别分析了当脉冲宽度为25fs、50fs和100fs时对应的SC的相干性,得到结果如图7(b)。仿真中设置泵浦波长为1300nm,光波导长度为3mm,泵浦峰值功率为1kW。由图可知,随着脉冲

宽度的增加,相干性逐渐降低。当脉宽为25fs时,在所有的光谱范围内都有较高的相干性;脉宽为50fs时,整个光谱只在中心波长处相干性较高;而当脉宽为100fs时,相干性整体较低。产生这种现象的原因是同等情况下,孤子分裂长度与脉宽成正比,脉宽越窄,则孤子分裂越早,光谱可以尽快覆盖调制不稳定性的增益范围,使得其无法放大噪声,从而减少了泵浦非相干光的产生,提高了SC的相干性。而宽脉冲需要较长的孤子分裂长度,光谱展宽无法覆盖调制不稳定增益带宽,背景噪声会被放大,从而产生与泵浦不相干的光谱。

通过比较发现,当泵浦中心波长为1300nm,峰值功率为0.5kW,脉冲宽度为25fs时,其中心波长处相干性大于0.95且整体相干性相对较高,因此应选

择相对具有低峰值功率及窄脉冲宽度的泵浦光,在获得宽光谱范围的同时能够保持其具有较高的相干性。

最后,将本文设计的片上 SC 光源与文献报道的其他类型片上 SC 光源进行比较,结果如表 1 所列。对比的性能参数包括以下五个:中心波长、峰值功率、脉冲宽度、波导长度和 SC 谱宽。其中,参考文献[65]中使用的波导长度为 15mm,虽产生了近 2000nm 带宽的 SC,但使用的泵浦光峰值功率达到 6000w,相较于其他文献较高。参考文献[71]中使用的最小泵浦峰值功率为 5w,但波导长度也长达 50mm,产生了 535nm 带宽的超连续谱。参考文献[72]中使用的波导长度为 6mm,泵浦峰值功率为 2000w,产生了近 3300nm 带宽的 SC,优于其他文献结果,但脉冲宽度最宽为 250fs。表 1 中各种超连续谱光源在不同性能参数下产生不同 SC 宽度,可满足不同的应用场景需求。通过该表可以看出,文献报道的中心波长在 1.33 μ m 的 SC 光源较少,脉宽宽、

且波导长度较长,而本文设计的 SC 光源在低峰值功率、窄脉宽、短波导条件下 SC 展宽相对较宽,因此具有显著优势和巨大的应用前景。

5 结论

基于 Si₃N₄ 的 SC 光源在光子集成领域具有重要应用,目前,人们已经采用传统的条形、槽型、脊型光波导结构实现了不同带宽的超连续谱,满足了不同领域的应用需求,但上述 SC 在中心波长、光谱宽度、功耗等方面仍不能满足实际应用需求。针对这一问题并结合 OCT 应用场景特点,本文创新性的提出了一种面向 OCT 应用的脊形悬空 Si₃N₄ 光波导,其中,悬空结构有效避免了 Si₃N₄ 波导芯中能量泄漏到基底,降低了光波导的吸收损耗,极大提升了 Si₃N₄ 波导芯对光场的束缚能力,脊型结构则可以增加波导色度色散调控维度,消除色散对沟槽加工的敏感,提升制造公差,并有效减少了波导的弯曲损耗。通过时域有限差分法对该波导的主要结构参数进

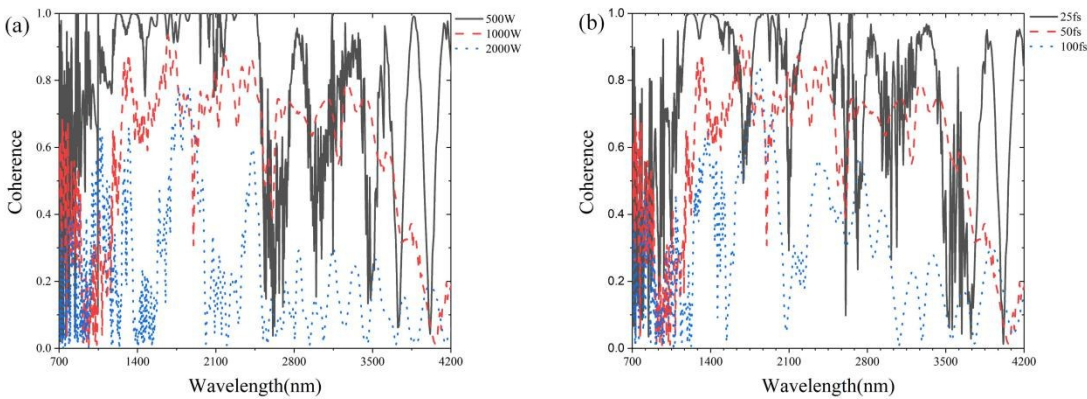


图 7 (a)在 P=0.5kW/1kW/2kW, t_{FWHM} =50fs 条件下的相干性与波长的关系;(b)在 P=1kW, t_{FWHM} =25fs/50fs/100fs 条件下的相干性与波长的关系。

Fig. 7 (a) Coherence plot at P=0.5kW/1kW/2kW, t_{FWHM} =50fs; (b) Coherence plot at P=1kW, t_{FWHM} =25fs/50fs/100fs

表 1 SC 光源性能比较

Table 1 Comparison of the performance of supercontinuum light sources

结构	中心波长/ μ m	峰值功率/w	脉冲宽度/fs	波导长度/mm	超连续谱宽/nm
2011 ^[65]	2.2	6000	120	15	630-2650
2011 ^[66]	2.12	12.7	200	20	1535-2525
2012 ^[67]	1.3	1.6e17	200	43	665-2025
2016 ^[68]	1.55	1.4e17	105	10	820-2250
2017 ^[69]	1.56	1400	\	1.7	1060-2200
2020 ^[70]	3.2	90000	100	5	504-4229
2021 ^[46]	1.3	5	200	50	990-1435
2022 ^[71]	1.55	2000	250	6	500-3800
2023 ^[72]	1.35	5000	50	5	750-3001
本文工作	1.3	2000	50	10	703-4014

行了优化,得到当 Si_3N_4 脊宽 $W=750\text{nm}$ 、脊高 $H+h_2=700\text{nm}$ 和 SiO_2 上覆层高 $h_1=150\text{nm}$ 时,该波导在可见光到中红外的宽光谱区域内呈现相对低而平坦的色散。基于该脊形悬空光波导,数值分析了在不同峰值泵浦功率、脉冲宽度和波导长度对产生的 SC 特性的影响。结果表明:基于所设计的 10mm 长脊形悬空 Si_3N_4 光波导,当泵浦波长为 1300nm (处于反常色散区)、峰值功率为 2kW 、脉宽为 50fs 时,在该光波导输出端产生了 -50dB 谱宽为 331nm ($703\sim 4014\text{nm}$,覆盖可见光到中红外波段)的超宽带相干 SC,其中心波长处相干性约 0.7 。本文所设计的片上超宽 SC 光源相较于已报道的 SC 光源,扩展了覆盖 1300nm 波段的片上 SC 光源应用的可能,并且在光通信、光传感、生物医学成像、和中红外环境监测等领域具有重要应用。

参考文献

- [1] KLENNER A, MAYER A S, JOHNSON A R, *et al.* Giga-hertz frequency comb offset stabilization based on supercontinuum generation in silicon nitride waveguide [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(10): 11043–11053.
- [2] WALDBURGER D, MAYER A S, ALFIERI C, *et al.* Tightly locked optical frequency comb from a semiconductor disk laser [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(3): 1786–1797.
- [3] SMIRNOV S V, ANIA-CASTANON J D, ELLINGHAM T J, *et al.* Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(2): 122–147.
- [4] SOTOBAYASHI H, CHUJO W, KITAYAMA K I, *et al.* Photonic gateway: TDM-to-WDM-to-TDM conversion and reconversion at 40 Gbit/s ($4\text{ channels}\times 10\text{ Gbits/s}$) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, **19**(11): 2810–2816.
- [5] RAMON A. MARTINEZ, KAIWEN GUO, TIANQU ZHAI, *et al.* Active mid-wave to long-wave supercontinuum FTIR sensor for standoff chemical detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, **37**(14): 3626–3636.
- [6] JONES D J, DIDDAMS S A, RANKA J K, *et al.* Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, **288**(5466): 635–639.
- [7] ISOBE K, WATANABE W, MATSUNAGA S, *et al.* Multi-Spectral Two-Photon Excited Fluorescence Microscopy Using Supercontinuum Light Source [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44**(5): 167–169.
- [8] ALEXANDER V V, DENG H, ISLAM M N, *et al.* Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser [C]. CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications, IEEE, San Jose, 2010.
- [9] DANIEL L, MARKS, AMY L, *et al.* Study of an ultrahigh-numerical-aperture fiber continuum generation source for optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(22): 2010–2012.
- [10] TANG T, ZHAO C C, ZHI Y, LI P, DING Z H. Ultra-high-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(17): 174201.
- [11] ZORIN I, GATTINGER P, EBNER A, BRANDSTETTER M. Advances in mid-infrared spectroscopy enabled by supercontinuum laser sources [J]. *Optics Express*, 2022, **30**(4): 5222–5254.
- [12] KOWALEVICZ A M, KO T, HARTL I, FUJIMOTO J G, *et al.* Ultrahigh resolution optical coherence tomography using a super luminescent light source [J]. *Optics Express*, 2002, **10**(7): 349–353.
- [13] ANDREAS W, MERLE S S, VERENA B, *et al.* Micro-optical coherence tomography for high-resolution morphologic imaging of cellular and nerval corneal micro-structures [J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, **11**(10): 5920–5933.
- [14] ZHU YUANHAO, WEN SHUYU, HE LI, *et al.* Research progress of silicon light sources in the Post-Moore Era [J]. *Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2021, **3**(1): 136–149.
- [15] ANGULO BARRIOS C, LIPSON M. Electrically driven silicon resonant light emitting device based on slot-waveguide [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(25): 10092–10101.
- [16] VINH N Q, HA N N, GREGORKIEWICZ T. Photonic properties of Er-doped crystalline silicon [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, **97**(7): 1269–1283.
- [17] WANG X J, NAKAJIMA T, ISSHIKI H, *et al.* Fabrication and characterization of Er silicates on SiO_2/Si substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(4): 041906.
- [18] ROELKENS G, VAN THOURHOUT D, BAETS R, *et al.* Laser emission and photodetection in an InP/In-GaAsP layer integrated on and coupled to a Silicon-on-Insulator waveguide circuit [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18): 8154–8159.
- [19] NORMAN J C, JUNG D, ZHANG Z, *et al.* A review of high-performance quantum dot lasers on silicon [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, **55**(2): 1–11.
- [20] WOLKIN M V, JORNE J, FAUCHET P M, *et al.* Electronic states and luminescence in porous silicon quantum dots: the role of oxygen [J]. *Physical Review Letters*, 1999, **82**(1): 197–200.
- [21] GELLOZ B, KOJIMA A, KOSHIDA N. Highly efficient and stable luminescence of nanocrystalline porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(3): 031107.
- [22] ABSTREITER G, EBERL K, FRIESS E, *et al.* Silicon/germanium strained layer superlattices [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1989, **95**(1): 431–438.
- [23] ZHANG LIN, LIN QIANG, YUE YANG, *et al.* On-Chip Octave-Spanning Supercontinuum in Nanostructured Silicon Waveguides Using Ultralow Pulse Energy [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, **18**(6): 1799–1806.
- [24] KARIM M. R., AI KAYED, NAYEM, JAHAN, NUS-

- RAT, ALAM, *et al.* Study of highly Coherent Mid-Infrared Supercontinuum Generation in CMOS Compatible Si-Rich SiN Tapered Waveguide [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, **40**(13): 4300–4310.
- [25] DIOUF, MBAYE, MANDENG, LUCIEN MANDENG, TCHAWOUA, *et al.* Mourad. Numerical investigation of supercontinuum generation through AsSe₂/As₂S₃ chalcogenide photonic crystal fibers and rib structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, **37**(22): 5692–5698.
- [26] EPPING J P, HOEKMAN M, MATEMAN R. High confinement, high yield Si₃N₄ waveguides for nonlinear optical applications [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(2): 642–648.
- [27] MOSS D J, MORANDOTTI R, LIPSON M. New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and hydex for nonlinear optics [J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**: 597–607.
- [28] ATABAKI A H, MOAZENI S, PAVANELLO F, *et al.* Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip [J]. *Nature*, 2018, **556**: 349–354.
- [29] XU H, JIANG Y H, FRIGG A, *et al.* Mode and polarization-division multiplexing based on silicon nitride loaded lithium niobate on insulator Platform [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2021, **16**(1): 584–587.
- [30] ZHAO Y X, QIU C, WU A M, *et al.* Low-loss and broadband polarization splitter and rotator and its application in DWDM receiver [C]. IEEE Photonics Conference, USA: IEEE, 2017, 8116139.
- [31] ROMERO G S, MERGET F, ZHONG F, *et al.* Silicon nitride CMOS compatible platform for integrated photonics applications at visible wavelengths [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(12): 14036–14046.
- [32] ZHANG H J, LI C, TU X G, *et al.* High efficiency silicon nitride grating coupler [J]. *Applied Physics A*, 2014, **115**(1): 79–82.
- [33] LAMY M, FINOT C, PARRIAUX A, *et al.* Si-rich Si nitride waveguides for optical transmissions and toward wavelength conversion around 2 μm [J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(19): 5165–5169.
- [34] OOI K J A, NG D K T, WANG T, *et al.* Pushing the limits of CMOS optical parametric amplifiers with USRN: Si₇N₃ above the two-photon absorption edge [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**: 13878.
- [35] YE Z, FÜLÖP A, HELGASON Ö, *et al.* Low-loss high-Q silicon-rich silicon nitride microresonators for Kerr nonlinear optics [J]. *Optics Letters*, 2019, **44**(13): 3326–3329.
- [36] ZHAO H, KUYKEN B, CLEMMEN, *et al.* Visible-to-near-infrared octave spanning supercontinuum generation in a silicon nitride waveguide [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(10): 2177–2180.
- [37] SCHMID G F. Axial and peripheral eye length measured with optical low coherence reflectometry [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, **8**(4): 655–662.
- [38] YAMANAKA M, KAWAGOE H, NISHIZAWA N, *et al.* High-power supercontinuum generation using high-repetition-rate ultrashort-pulse fiber laser for ultrahigh-resolution optical coherence tomography in 1600 nm spectral band [J]. *Applied Physics Express*, 2016, **9**: 022701.
- [39] YAMANAKA M, TERANISHI T, KAWAGOE H, *et al.* Optical coherence microscopy in 1700nm spectral band for high-resolution label-free deep-tissue imaging [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 31715.
- [40] KANG J, FENG P, WEI X, *et al.* 102-nm, 44.5-MHz inertial-free swept source by mode-locked fiber laser and time stretch technique for optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(4): 4370–4381.
- [41] LEITGEB R, HITZENBERGER C K, FERCHER A F. Performance of Fourier domain vs time domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(8): 889–894.
- [42] NISHIZAWA N, KAWAGOE H, YAMANAKA M, MATSUSHIMA M, MORI K, KAWABE T. Wavelength dependence of ultrahigh-resolution optical coherence tomography using supercontinuum for biomedical imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **25**(1): 1–15.
- [43] HARTL I, LI X D, CHUDоба C, GHANTA R K, KO T H, *et al.* Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(9): 608–610.
- [44] KHANH Q K, NASSER N P, JUSTIN K, JENNIFER K B, ANNA E. Ultrahigh resolution all-reflective optical coherence tomography system with a compact fiber-based supercontinuum source [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, **16**(10): 106004.
- [45] RATHEESH K M, MURUKESHAN V M, LEONG K S. Optical frequency domain imaging with a rapidly swept laser in the 1300nm bio-imaging window [C]. International Conference on Optical and Photonic Engineering, 2015, 9524.
- [46] JI X C, MOJAHED D, OKAWACHI Y, GAETA A, *et al.* Millimeter-scale chip-based supercontinuum generation for optical coherence tomography [J]. *Science Advances*, 2021, **7**(38): 8869.
- [47] PRADEEP P, NAOMI N, BUATIS J K, *et al.* High-quality doped polycrystalline silicon using low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD) [J]. *Energy Procedia*, 2018, **150**: 9–14.
- [48] CHEN Z H, LIU H J, WANG Z L, HUANG N. Phase-sensitive amplification of a QPSK signal using a dispersion engineered silicon-graphene oxide hybrid waveguide [J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(7): 1801–1807.
- [49] LUKE K, OKAWACHI Y, LAMONT M R, *et al.* Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si₃N₄ micro-resonator [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(21): 4823–4826.
- [50] MALITSON I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, **55**(10): 1205–1208.
- [51] TAN C Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, **223**(1): 158–163.
- [52] ZHANG L, AGARWAL A M. Nonlinear group IV photonics based on silicon and germanium: from near-infrared to mid-infrared [J]. *Nanophotonics*, 2013, **3**(4): 247–268.

- [53] AGRAWAL G. Optics and photonics in Nonlinear Fiber Optics (Fifth Edition) [M], 2013, 457 - 496.
- [54] JAFARI Z, EMAMI F. Strip/Slot hybrid arsenic tri-sulfide waveguide with ultra-flat and low dispersion profile over an ultra-wide bandwidth[J]. *Optics Letters*, 2013, **38** (16): 3082 - 3085.
- [55] IKEDA K, SAPERSTEIN R E, ALIC N, *et al.* Thermal and kerr nonlinear properties of plasma-deposited silicon nitride/silicon dioxide waveguides [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(17): 12987 - 12994.
- [56] ZHU M, LIU H, LI X, *et al.* Ultra-broadband flat dispersion tailoring of dual-slot silicon waveguides [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14): 15899 - 15907.
- [57] LI P, SHI L, MAO Q H. A fourth-order Runge-Kutta in the interaction picture algorithm for simulating coupled generalized nonlinear Schrödinger equation and its error analysis [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62** (15) : 154-205.
- [58] DULKEITH E, VLASOV Y A, CHEN X G, *et al.* Self-phase-modulation in submicron silicon-on insulator photonic wires [J]. *Optics Express*, 2006, **14** (12) : 5524-5534.
- [59] DUDLEY J M, GENTY G, COEN S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1135 - 1184.
- [60] SCHREIBER T, ANDERSEN T V, SCHIMPF D, *et al.* Supercontinuum generation by femtosecond single and dual wavelength pumping in photonic crystal fibers with two zero dispersion wavelengths[J]. *Optics Express*, 2005, **13** (23): 9556 - 9569.
- [61] POVAZAY B, BIZHEVA K, UNTERHUBER A, HERMANN B, SATTMANN H, *et al.* Submicrometer axial resolution optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(20): 1800-1802.
- [62] WANG Y M, TOMOV I, NELSON J S, CHEN Z P, LIM H, WISE F. Low-noise broadband light generation from optical fibers for use in high-resolution optical coherence tomography [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, **22**(8): 1492 - 1499.
- [63] DUDLEY J M, COEN S. Fundamental limits to few-cycle pulse generation from compression of supercontinuum spectra generated in photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2004, **12**(11):2423-2428.
- [64] PAULSEN H N, HILLIGSE K M, THOGERSEN J, KEIDING S R, LARSEN J L. Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy with a photonic crystal fiber based light source[J].2003, *Optics Letters*, **28**(13):1123-1125.
- [65] ZHANG Lin, YAN Yan, YUE Yang, *et al.* On-chip two-octave supercontinuum generation by enhancing self-steepening of optical pulses[J]. *Optics Express*, 2011, **19** (12):11584-11590.
- [66] KUYKEN B, LIU X, OSGOOD R M, *et al.* Mid-infrared to telecom-band supercontinuum generation in highly nonlinear silicon-on-insulator wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21): 20172 - 20181.
- [67] HALIR R, OKAWACHI Y, LEVY J S, *et al.* Ultrabroadband supercontinuum generation in a CMOS compatible platform[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**: 1685 - 1687.
- [68] LIU Xing, PU Minghao, ZHOU Binbin, *et al.* Octave-spanning supercontinuum generation in a silicon-rich nitride waveguide [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(12) : 2719 - 2722.
- [69] ISHIZAWA A, GOTO T, KOU R, *et al.* Octave-spanning supercontinuum generation at telecommunications wavelengths in a precisely dispersion- and length-controlled silicon-wire waveguide with a double taper structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**: 021105.
- [70] FANG Y, CHANG J B, ZHI W, *et al.* Three-octave supercontinuum generation using SiO₂ cladded Si₃N₄ slot waveguide with all-normal dispersion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, **38**(13): 3431-3438.
- [71] DENG Z, ZHANG J, FAN D, ZHANG L. Parametrically tunable mid-infrared resonant radiation by four-wave mixing in silicon nitride nanophotonic waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, **40**(15): 5236-5244.
- [72] ZHANG J, ZHANG S, JIANG X, *et al.* Numerical study on flat dispersion in a single-layer Si₃N₄ coupled-waveguides with four zero-dispersion wavelengths for supercontinuum generation [J]. *Optics and Laser Technology*, 2023, **160**:109061.