

宏观弯曲效应对 ZBLAN 光纤中红外超连续光谱产生的影响

王振洪¹ 赵文静¹ 朱 辰² 曹 玮¹ 王 志¹ 刘艳格¹

¹光电信息科学教育部重点实验室南开大学现代光学研究所, 天津 300071

²固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 基于数值模拟方法研究了弯曲效应对 ZBLAN 光纤中红外超连续光谱产生的影响。利用有限元方法分析了宏观弯曲效应对不同数值孔径 ZBLAN 光纤的限制损耗、色散和非线性特性的影响, 计算出 ZBLAN 光纤的弯曲截止波长, 基于广义非线性薛定谔方程模拟了 ZBLAN 光纤中红外超连续谱产生的演化过程。研究发现, 在未发生弯曲的情况下, 非线性系数在中红外波段迅速下降会限制低数值孔径 ZBLAN 光纤中的光谱展宽; 在发生弯曲时, 当孤子中心频率接近弯曲损耗边界时, 孤子自频移效应被抑制, 光谱展宽停止。

关键词 光纤光学; 中红外超连续谱; ZBLAN 光纤; 弯曲损耗

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1206002

Influences of Macroscopic Bending on Mid-Infrared Supercontinuum Generation in ZBLAN Fibers

Wang Zhenhong¹ Zhao Wenjing¹ Zhu Chen² Cao Wei¹ Wang Zhi¹ Liu Yange¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute Modern of Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

²Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China

Abstract The effect of mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fibers is numerically investigated. Based on the finite element method, the influences of macroscopic bending on confinement loss, dispersion and nonlinearity of ZBLAN fibers with different numerical apertures are analyzed, and the bending cut-off wavelength of ZBLAN fibers is figured out. The evolution of mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fibers is simulated by using the general nonlinear Schrödinger's equation. The results indicate that the drastic dropping of nonlinear coefficient in mid-infrared wavelength region suppresses the spectral broadening of ZBLAN fibers with low numerical aperture when no bending is applied. In the presence of bending, when the central frequency of the soliton approaches the boundary of bending-induced loss region, the soliton self-frequency shift effect is suppressed and the spectral broadening phenomenon is radicated as well.

Key words fiber optics; mid-infrared supercontinuum; ZBLAN fibers; bending loss

OCIS codes 060.4370; 320.6629; 190.4370

1 引 言

超连续光谱产生(SCG)是指高功率的短脉冲光通过非线性介质的过程中, 由于介质的非线性效应, 使得输

收稿日期: 2015-06-11; 收到修改稿日期: 2015-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(11174154, 11174155)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCZDJC31300)、固体激光技术重点实验室基金(9140C040113130C04015)

作者简介: 王振洪(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器及超连续谱方面的研究。E-mail: tjwzh843@163.com

导师简介: 王 志(1976—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事微纳结构光纤和光纤激光技术方面的研究。

E-mail: zhiwang@nankai.edu.cn(通信联系人)

入脉冲光的光谱得到极大展宽的现象。2000年,Ranka等^[1]首次通过光子晶体光纤获得覆盖可见光和近红外光区域的超连续谱。这使基于光纤介质的超连续光源获得了广泛的关注^[2-3]。目前基于高非线性光纤的超连续光源已经被广泛应用于光学相干层析成像^[4]、超光谱红外显微镜学^[5]、制药^[6]、光谱指纹^[7]等领域。由于中红外光源在光学测量^[8]、天文学^[9]、生物医学^[10]等方面有着广泛的应用,所以近年来研制结构紧凑的中红外波段超连续光源成为研究的热点。但由于传统的石英光纤在2.5 μm以上中红外波段具有很强的吸收损耗^[11],为了获得更宽的超连续谱,必须寻找其他基质材料的光纤。目前,在中红外超连续产生中常用的是软玻璃光纤,包括氟化物光纤、碲化物光纤、硫化物光纤等。其中以ZBLAN(ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF)光纤为代表的氟化物光纤制作工艺最成熟,具有相对较好的物化性能,被广泛应用于产生覆盖3~5 μm中红外波段的超连续谱。2011年,Kulkarni等^[12]使用掺铥光纤放大器系统通过ZBLAN单模光纤产生了1.9~4.5 μm的超连续谱。最近,国内的研究机构在中红外超连续谱激光源方面取得了一些进展性成果。2013年,张斌等^[13]比较详细地报道了1.9~4.3 μm全光纤中红外超连续谱的实验研究,其对应的最大平均输出功率为185 mW。同年,该课题组又实现了平均输出功率为7.1 W的中红外超连续谱^[14],光谱范围为1.9~3.9 μm。2014年,该课题组再一次获得了平均功率为13 W的超连续谱(1.9~4.3 μm)^[15]。2014年,刘江等^[16]在ZBLAN单模光纤中实现了平均输出功率为16.2 W的中红外超连续谱,光谱范围为1.9~3.5 μm。同年,该课题组又获得了平均功率为21.8 W的超连续谱(1.9~3.8 μm)^[17]。

随着波长的增加,光纤的模场面积会迅速增大,这将导致光纤在中红外波段的非线性系数下降而弯曲损耗增加,对光谱向中红外波段进一步展开产生不利影响。由于在中红外超连续产生中,通常需要ZBLAN单模光纤的长度较长,结构较为紧凑,因此需要考虑弯曲损耗的影响。尽管目前对于ZBLAN光纤中红外超连续产生过程已经有系统的理论研究^[18-19],但是对于宏观弯曲效应的影响还缺少系统的研究。

本文利用数值模拟方法研究了宏观弯曲效应对ZBLAN光纤的特性和中红外超连续谱产生的影响。首先利用有限元方法研究了不同数值孔径(NA)ZBLAN光纤的色散、损耗和非线性特性及其受弯曲效应的影响,计算了不同弯曲半径和数值孔径下光纤的弯曲截止波长。基于广义非线性薛定谔方程分析了数值孔径和弯曲损耗对于超连续光谱展宽的影响。在该研究中,高阶孤子的分裂和孤子自频移效应在中红外光谱展宽中起主要作用。研究发现在未发生弯曲的情况下,非线性系数在中红外波段迅速下降会减慢孤子自频移的速度,从而限制低数值孔径ZBLAN光纤中的光谱展宽,而在发生弯曲时,当孤子中心频率接近弯曲损耗边界时,孤子自频移效应被抑制,光谱展宽停止,利用这一效应可以对超连续输出光谱形状进行控制。本文的研究工作在ZBLAN光纤和中红外超连续输出光谱的优化设计方面,具有重要意义。

2 理论模型

通过广义非线性薛定谔方程模拟光纤中光脉冲演化产生超连续谱的过程,其表达式为^[20-21]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \sum_{m \geq 2} \frac{i^{m-1}}{m!} \beta_m \frac{\partial^m A}{\partial T^m} = \sum_{m \geq 0} \frac{i^{m+1}}{m!} \gamma_m \frac{\partial^m}{\partial T^m} \left(A \int_{-\infty}^{+\infty} R(T') |A(z, T-T')|^2 dT' \right), \quad (1)$$

式中 $A(z, T)$ 为电场的复包络, z 代表传播距离, T 代表时间; α 是光纤线性损耗; β_m 是模式传播常数 $\beta(\omega)$ 的 m 阶色散系数; γ_m 是非线性系数 $\gamma(\omega)$ 的 m 阶导数; 响应函数 $R(T) = (1 - f_r)\delta(T) + f_r h_r(T)$, 描述了瞬时电子贡献和延迟拉曼贡献, 其中, f_r 为延迟拉曼响应对非线性极化的小数贡献, $h_r(T)$ 为拉曼响应函数。

利用 COMSOL 有限元软件计算出 ZBLAN 光纤的有效折射率和有效面积, 从而进一步得出色散、损耗特性和非线性参量。设定 ZBLAN 光纤纤芯直径为 9 μm, 包层直径为 125 μm, 选取的 ZBLAN 的材料组分是 53% ZrF₄-20% BaF₂-4% LaF₃-3% AlF₃-20% NaF, 百分数指该组分在该材料中的质量分数, 计算中材料的折射率可用二级 Sellmeier 公式比较精确地表达为^[22]

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^2 f_i \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_i^2), \quad (2)$$

式中 $n(\lambda)$ 是材料折射率, λ 是波长, $f_1=1.22514$, $f_2=1.52898$, $\lambda_1=0.08969 \mu\text{m}$, $\lambda_2=21.3825 \mu\text{m}$ 。通过基模的有效折射率计算得出传播常数 β , 从而可以得出光纤的色散参量 D , 公式如下^[20]:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \quad (3)$$

式中:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots, \quad (4)$$

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (5)$$

其中, c 为真空中的光速, ω 为真空中的光波频率。由于计算中考虑了材料折射率随波长的变化, 因此计算获得的色散 D 同时包括了材料色散和波导色散。

ZBLAN 的非线性参量 γ 可以通过计算出的有效面积 $A_{\text{eff}}(\lambda)$ 得到, 公式如下^[20]:

$$\gamma(\lambda) = \frac{n_2 2\pi}{\lambda A_{\text{eff}}(\lambda)}, \quad (6)$$

式中克尔系数 $n_2 = 2.55 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ^[12,18]。

ZBLAN 光纤的损耗包括限制损耗和材料损耗两部分。在有限元软件计算中引入完美匹配层 (PML), 限制损耗可以通过等效折射率的虚部推算出来^[23]:

$$\alpha_{\text{conf}} = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} I_m(n_{\text{eff}}). \quad (7)$$

当光纤弯曲时, 可以把弯曲的光纤等效为在弯曲方向上具有折射率梯度分布的直光纤^[24], 因此沿弯曲方向任一点的折射率可表示为

$$n(x, y) = n_0(x, y) \left(1 + \frac{y}{R} \right). \quad (8)$$

这里以光纤弯曲方向为 y 方向, 以垂直于 y 的光纤中心轴线为 x 方向, 中心轴线与 y 轴的交点为零点, R 为弯曲半径, $n_0(x, y)$ 是未弯曲时光纤的横截面折射率分布, $n(x, y)$ 是等效的直波导的折射率分布。在这里, 取 FiberLabs 公司提供的 ZBLAN 光纤的材料损耗^[25], 如图 1 所示, 其中, 实线是 FiberLabs 公司提供的数据, 虚线是为了方便计算预测的损耗。

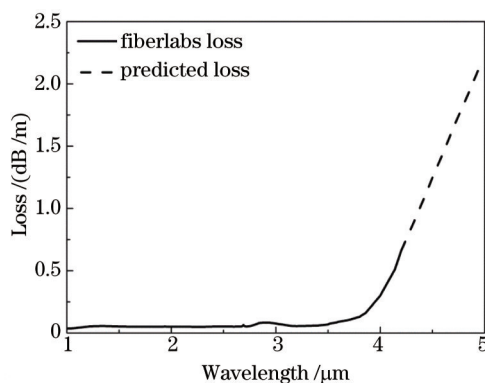


图 1 ZBLAN 光纤的材料损耗

Fig.1 Material loss of ZBLAN fiber

3 数值孔径对 ZBLAN 光纤中红外超连续产生的影响

首先, 比较了在没有弯曲时, $NA=0.2$ 、 0.25 、 0.3 三种数值孔径的色散和非线性, 如图 2(a)和(b)所示。由图 2(a)可以看出, 在数值孔径一定的情况下, 随着波长的逐渐增加, 色散逐渐增加, 从正常色散变化为反常色散。随着数值孔径的增大, 色散增大, 零色散波长 (ZDW) 向短波方向移动, $NA=0.2$ 、 0.25 、 0.3 三种不同情况的零色散波长分别是 1.65 、 1.55 、 $1.5 \mu\text{m}$ 。图 2(b)显示了非线性系数 γ 随着波长的变化, 对于 $NA=0.2$ 、 0.25 、 0.3 三种不同情况, 在波长为 $2 \mu\text{m}$ 处对应的 γ 分别为 1.2541 、 1.4849 、 $1.6499 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 在波长为 $4 \mu\text{m}$ 处, 对应 γ 分别为 0.1922 、 0.3323 、 $0.4494 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。可以看出在随着波长的增加, γ 会显著下降, 而 NA 越小, 在长波区域对光的约束能力越差, 下降的越显著, 在 $4 \mu\text{m}$ 处, $NA=0.3$ 的非线性参数 γ 是 $NA=0.2$ 的 2.3 倍。在这里, 通过分步傅里叶法求解方程(1)式, 模拟皮秒脉冲在 ZBLAN 光纤中产生超连续谱的情况。为了准确描述光纤色散和非线性参数随波长的变化, 在(1)式取 10 阶和 5 阶多项式拟合来表示色散和非线性参数随波长的变化。在没有弯曲的情况下, 在模拟的波长范围内, 3 种 NA 的光纤限制损耗都可以忽略, 光纤的损耗由图 1 的材料吸收损耗

决定。假设初始抽运光为无啁啾的双曲正割脉冲,中心波长为 $2\ \mu\text{m}$,脉冲的峰值功率为 $10\ \text{kW}$,脉冲宽度(半峰全宽)为 $1\ \text{ps}$ 。设定光纤的长度是 $10\ \text{m}$,忽略不同光纤之间耦合的损耗。

图3显示了没有弯曲时, $NA=0.2, 0.25, 0.3$ 三种不同情况下,光纤尾端的光谱演化情况。在3种情况下,抽运波长都位于光纤的反常色散区,从光谱的演化过程可以看出,光谱的展宽过程主要是由高阶孤子分裂和孤子自频移造成的。光纤中传输的孤子阶数 N 可以用 $N^2 = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}$ [20] 计算,其中 P_0 是峰值功率, T_0 是入射脉冲宽度。在抽运波长 $2\ \mu\text{m}$ 附近时, $NA=0.2, 0.25, 0.3$ 三种不同情况下的孤子个数 N 分别是 $26, 24, 24$ 。由于高阶色散和拉曼效应的影响,高阶孤子是不稳定的,依次分裂为多个基态孤子,如图3所示。分裂出的基态

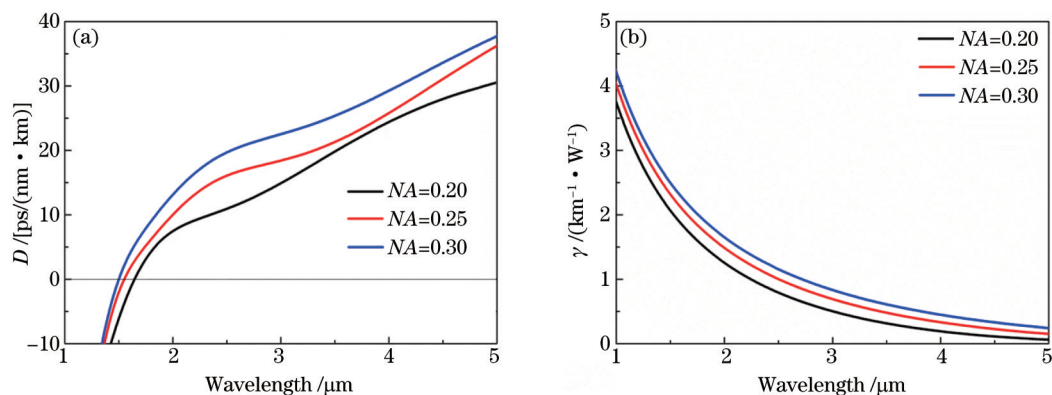


图2 (a) 在 $NA=0.2, 0.25, 0.3$ 时, ZBLAN 光纤的色散特性; (b) 在 $NA=0.2, 0.25, 0.3$ 时, ZBLAN 光纤的非线性参量 γ
 Fig. 2 (a) Dispersive properties of ZBLAN fibers for $NA=0.2, 0.25, 0.3$; (b) nonlinearity γ of ZBLAN fibers for $NA=0.2, 0.25, 0.3$

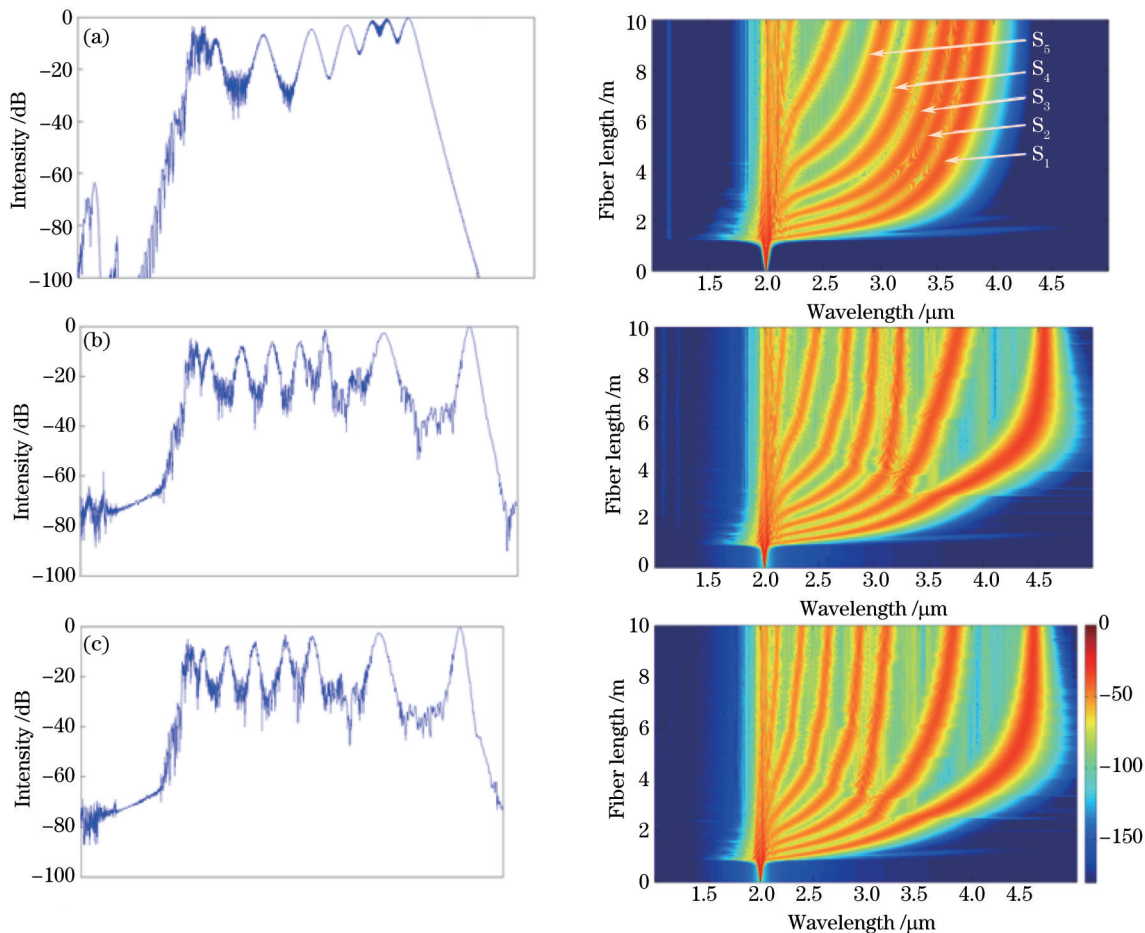


图3 在(a) $NA=0.2$ 、(b) $NA=0.25$ 、(c) $NA=0.3$ 时, ZBLAN 光纤中频域的演化和等值线图
 Fig. 3 Spectral evolution and contour plots in ZBLAN fibers for (a) $NA=0.2$ 、(b) $NA=0.25$ 、(c) $NA=0.3$

孤子由于拉曼效应产生孤子自频移,随脉冲向长波方向展宽。3种数值孔径下,产生的超连续光谱红外边缘都可以到达4 μm ,其中当 $NA=0.25$ 和 0.3 时,光谱可以超越4.5 μm ,但是由于在4.5 μm 及更长波段材料损耗增大,导致由受激拉曼散射效应造成的孤子自频移过程被抑制,光谱展宽停止。另外从图中可以看出:当 $NA=0.2$ 时,在短波方向,1~1.5 μm 内有一处非常低的峰,这是抽运光在光纤中的三阶色散形成的色散波导致的。而在4 μm 处,当 $NA=0.2$ 时,由于光纤的非线性系数只是 $NA=0.25$ 的58%, $NA=0.3$ 的43%,限制了光谱的进一步展宽。此外,需要注意的是由于光纤的吸收损耗,并不是光纤越长光谱展宽越宽。从图3中可以看出,对于 $NA=0.25$ 和 0.3 的情况,光谱在光纤长度为5 m的时候达到最宽的范围,进一步增加光纤长度,材料吸收效应导致光谱变窄。

4 弯曲损耗对中红外超连续产生的影响

计算了不同 NA 的ZBLAN光纤在不同弯曲半径下的弯曲损耗和基模的弯曲截止波长,这里的弯曲截止波长是指弯曲损耗大于3 dB/m所对应的波长。图4显示了弯曲截止波长随 NA 的变化,由图中可以看出,当弯曲半径 R 不变时,随着 NA 的增大,截止波长逐渐增大,两者之间具有近似线性的关系;当 NA 一定时,随着弯曲半径 R 的减小,截止波长逐渐增大。根据图4,当弯曲半径 $R \geq 100$ mm时,为了获得3.5 μm 以上的超连续展宽,光纤的 NA 应大于0.15。虽然高 NA 的光纤更容易获得中红外的波段的光谱展宽,但是较大的 NA 制造起来比较困难,易受高阶模式的影响,因此,在设计ZBLAN光纤的时候,可以根据不同的需求,设计不同 NA 的光纤。

以 $NA=0.2$ 的ZBLAN光纤为例,分析弯曲损耗对超连续光谱产生的影响。当 $NA=0.2$ 时,图5显示了无弯曲状态和弯曲半径为 $R=10, 15, 20, 30, 40, 50$ mm时光纤的色散、非线性参量和限制损耗。由图5(a)可知,随着弯曲半径的减小,限制损耗不断变大,弯曲截止波长向短波移动。当弯曲半径为10 mm时,损耗从3.2 μm 处开始直线上升,并且超过了6 dB/m,而在没有弯曲的情况下,直到5 μm 的时候,损耗仍然小于0.1 dB/m;图5(b)表示弯曲半径的大小对非线性参数的影响,插图显示的是3~5 μm 波长范围内的放大图,由插图可以清晰看出,随着弯曲半径的减小,非线性逐渐减小,但相对变化不大;图5(c)显示了群速度色散随弯曲半径的变化,由于弯曲所造成的模式截止发生在3 μm 附近或更长的波长,因此在短波区域,弯曲对色散的影响很小,零色散波长基本不变,而在长波方向色散变化比较大,这是由弯曲导致的模式截止造成的。

接着研究弯曲效应对超连续展宽过程的影响,输入的抽运脉冲与无弯曲时相同,图6显示了弯曲半径 R 为10、15、20 mm时,光纤尾端的光谱展宽。如图6所示,随着弯曲半径的减小,光谱展宽越来越窄。图7显示了展宽光谱的长波边界随曲率($1/R$)的变化,当 R 为10 mm时,由于在长波方向弯曲损耗过大,导致光谱展宽到3.25 μm 处就停止了;当 R 为15 mm时,光谱可以展宽到3.5 μm ;当 $R=20$ mm时,光谱展宽到3.8 μm ,而进一步增大弯曲半径(减小曲率),光谱可展宽到4 μm ,与图3(a)中没有弯曲的情况基本相同。

为了进一步分析孤子的演化情况,图8中分别显示了弯曲半径 $R=15$ mm和没有弯曲时输出的时频图。比较图8和其所对应的光谱演化图[即图6(b),图3(a)]可以看出,在无弯曲的情况下,由抽运脉冲分裂产生的孤子 S_1 - S_5 在拉曼效应的作用下依次发生红移,这些孤子在时域上相互分离,并且具有不同的中心波长,它们形成3~4 μm 波段的中红外光谱。而在弯曲半径为 $R=15$ mm的情况下,孤子 S_1 、 S_2 、 S_3 在红移过程中依次接近弯曲损耗的截止波长,此时由于孤子在长波段的损耗增大,受激拉曼效应受到抑制,孤子的中心波长基本保持不变。此时这些孤子在时域上仍然是相互分离的,但是在光谱上它们覆盖的波长范围基本相同。而对于光谱尚未到达弯曲损耗边界的孤子(如 S_5),其演化规律基本不受弯曲的影响。

对于其他 NA 的ZBLAN光纤,弯曲效应对孤子演化和超连续产生过程的影响与 $NA=0.2$ 的情况基本类似,不同的是根据图4所示的 NA 与弯曲截止波长的关系, NA 更小的ZBLAN光纤对弯曲效应更加敏感,在较大的弯曲半径情况下就可以观察到弯曲效应的影响,此时为了获得更宽的光谱,应控制弯曲半径保证弯曲截止波长大于材料吸收所形成的截止波长范围。同时由于孤子自频移抑制造成的损耗相对较低,这也为利用光纤的弯曲控制输出的光谱形状提供了可能。通过合理地设计光纤的弯曲控制光谱的红移边界,可以使光谱中能量更多地集中到所需的波段,并减少孤子之间的光谱间隔。

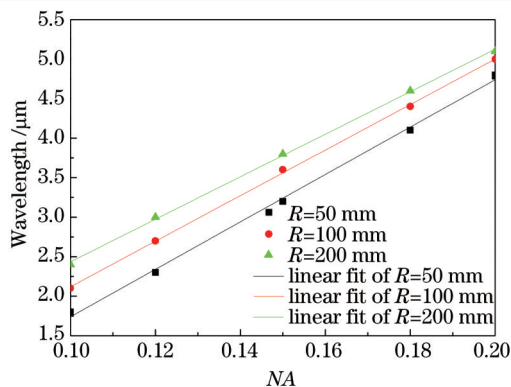


图4 不同NA时,ZBLAN光纤的弯曲截止波长

Fig. 4 Bend cut-off wavelengths of ZBLAN fibers for different NA

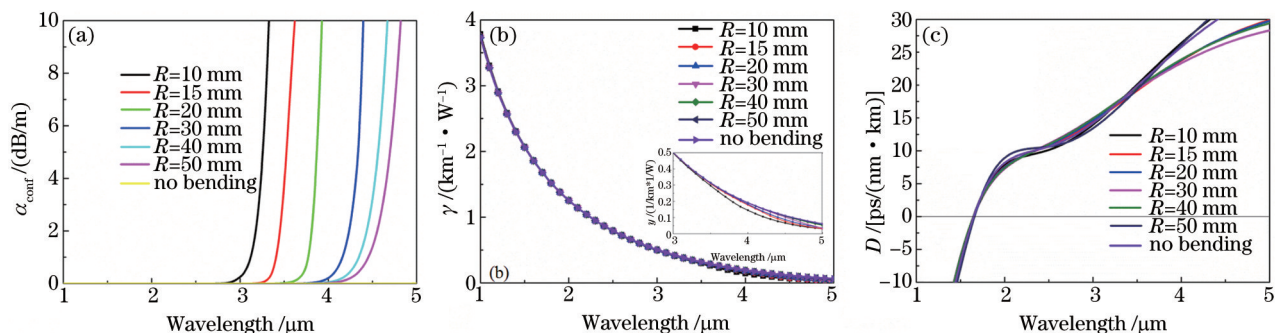


图5 在NA=0.2,在不同弯曲半径时,ZBLAN光纤的(a)限制损耗 α_{conf} 、(b)非线性参量 γ 、(c)色散特性

Fig. 5 (a) Confine loss α_{conf} , (b) nonlinearity γ , (c) dispersive property of ZBLAN for NA=0.2 in different bending radii

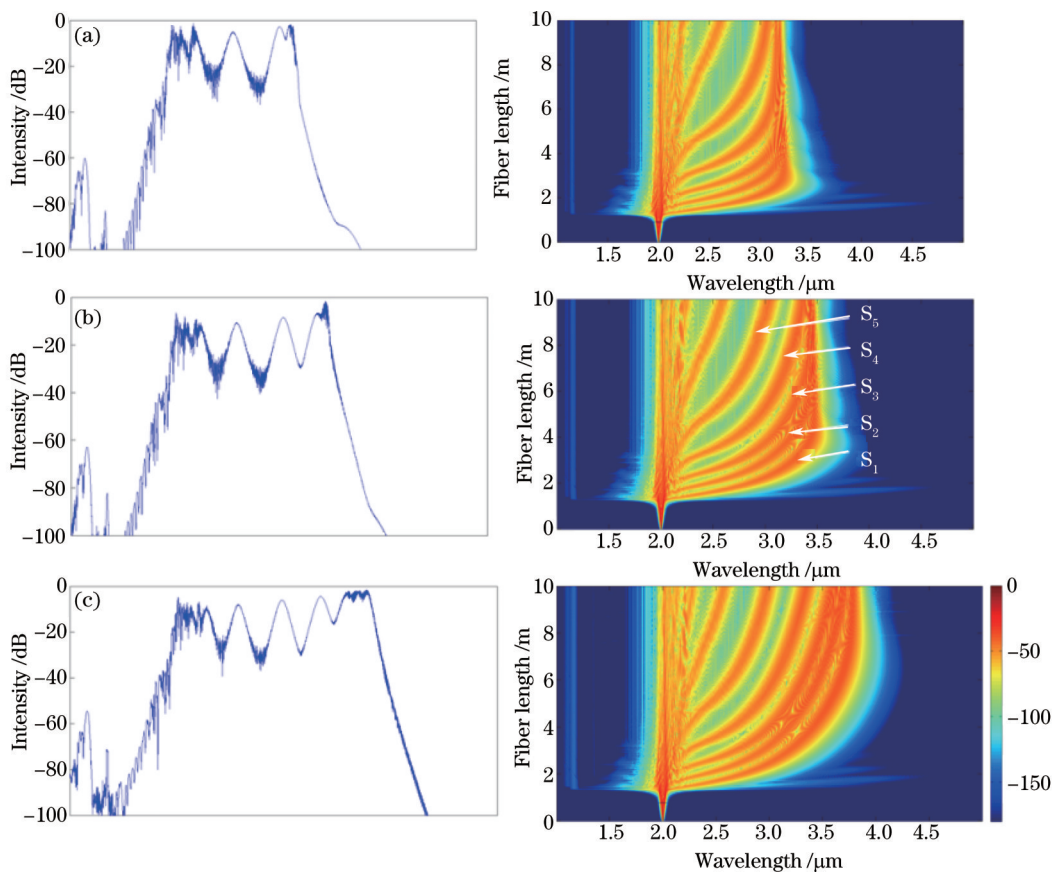


图6 当NA=0.2时,ZBLAN光纤中频域的演化和等值线图。(a) R=10 mm; (b) R=15 mm; (c) R=20 mm

Fig. 6 Spectral evolutions and contour plots in ZBLAN fibers with NA=0.2 for (a) R=10 mm; (b) R=15 mm; (c) R=20 mm

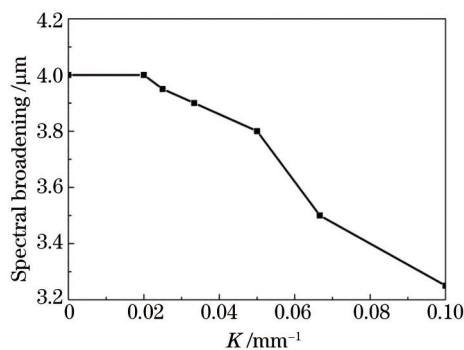


图7 频谱展宽和曲率K的关系

Fig.7 Spectral broadening versus curvature

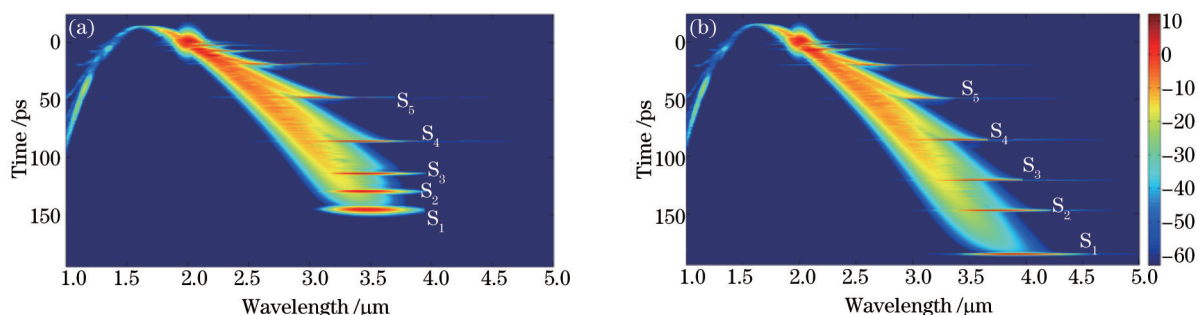


图8 当NA=0.2时,ZBLAN 光纤中时域的演化。(a) R=15 mm ;(b) 没有弯曲的情况

Fig.8 Temporal evolutions in ZBLAN fibers with NA= 0.2 for (a) R=15 mm; (b) no bending

5 结 论

本文对宏观弯曲效应在ZBLAN光纤中红外超连续谱产生的影响,进行了较为系统的数值研究。研究表明:在同样的弯曲半径下,数值孔径越小,弯曲损耗越大;当数值孔径一定时,弯曲半径越小,弯曲损耗越大,非线性越小,光谱展宽越窄。当需要输出的光谱较宽时,可以适当增加数值孔径,或者在较大的数值孔径时适当减小弯曲(增加弯曲半径);当所需中红外光谱只集中在某个特定的波长范围时,可以适当减小数值孔径,或者在较大的数值孔径时适当增加弯曲(减小弯曲半径),使更多的能量集中在该波长范围内,从而实现光谱的优化设计与调控。上述的数值模拟对根据不同需求,设计不同NA的ZBLAN光纤,有着较为重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. Opt Lett, 2000, 25(1): 25-27.
- 2 Morioka T, Mori K, Kawanishi S, *et al.* Multi-WDM-channel, Gbit/s pulse generation from a single laser source utilizing LD-pumped supercontinuum in optical fibers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1994, 6(3): 365-368.
- 3 Takara H. Multiple optical carrier generation from a supercontinuum source[J]. Optics and Photonics News, 2002, 13(3): 48-51.
- 4 Hartl I, Li X D, Chudoba C, *et al.* Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber[J]. Opt Lett, 2001, 26(9): 608-610.
- 5 Dupont S, Petersen C, Thøgersen J, *et al.* IR microscopy utilizing intense supercontinuum light source[J]. Opt Express, 2012, 20(5): 4887-4892.
- 6 Ke K, Xia C, Islam M N, *et al.* Mid-infrared absorption spectroscopy and differential damage in vitro between lipids and proteins by an all-fiber-integrated supercontinuum laser[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 12627-12640.
- 7 Kaminski C F, Watt R S, Elder A D, *et al.* Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy[J]. Appl Phys B, 2008, 92(3): 367-378.
- 8 Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. Nature, 2002, 416(6877): 233-237.

- 9 Monnier J D. Optical interferometry in astronomy[J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(5): 789–857.
- 10 Guo B, Wang Y, Peng C, *et al.*. Laser-based mid-infrared reflectance imaging of biological tissues[J]. Opt Express, 2004, 12(1): 208–219.
- 11 Izawa T, Shibata N, Takeda A. Optical attenuation in pure and doped fused silica in the IR wavelength region[J]. Appl Phys Lett, 1977, 31(1): 33–35.
- 12 Kulkarni O P, Alexander V V, Kumar M, *et al.*. Supercontinuum generation from ~ 1.9 to $4.5\ \mu\text{m}$ in ZBLAN fiber with high average power generation beyond $3.8\ \mu\text{m}$ using a thulium-doped fiber amplifier[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(10): 2486–2498.
- 13 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, *et al.*. All-fiber mid-infrared supercontinuum source from $1.9\ \mu\text{m}$ to $4.3\ \mu\text{m}$ [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102013.
张 斌, 杨未强, 侯 静, 等. $1.9\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102013.
- 14 Yang W, Zhang B, Yin K, *et al.*. High power all fiber mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a $2\ \mu\text{m}$ MOPA system[J]. Opt Express, 2013, 21(17): 19732–19742.
- 15 Yang Weiqiang, Zhang Bin, Xue Guanghui, *et al.*. 13 W all fiber mid-infrared supercontinuum source[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305001.
杨未强, 张 斌, 薛光辉, 等. 13 W 全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305001.
- 16 Liu Jiang, Liu Kun, Shi Hongxing, *et al.*. High power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser source[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0902004.
刘 江, 刘 昆, 师红星, 等. 高功率全光纤中红外超连续谱激光光源[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902004.
- 17 Liu K, Liu J, Shi H, *et al.*. High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power[J]. Opt Express, 2014, 22(20): 24384–24391.
- 18 Agger C, Petersen C, Dupont S, *et al.*. Supercontinuum generation in ZBLAN fibers—detailed comparison between measurement and simulation[J]. J Opt Soc Am B, 2012, 29(4): 635–645.
- 19 Kubat I, Agger C S, Moselund P M, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation to $4.5\ \mu\text{m}$ in uniform and tapered ZBLAN step-index fibers by direct pumping at 1064 or $1550\ \mu\text{m}$ [J]. J Opt Soc Am B, 2013, 30(10): 2743–2757.
- 20 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. Academic Press, 2007: 7–44, 89–90.
- 21 Akhmanov S A, Vysloukh V A, Chirkin A S. Optics of femtosecond laser pulses[J]. American Institute of Physics, 1992: 20–26.
- 22 Gan F. Optical properties of fluoride glasses: A review[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 184: 9–20.
- 23 White T P, Kuhlmeiy B T, McPhedran R C, *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation[J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(10): 2322–2330.
- 24 Birks T A, Luan F, Pearce G J, *et al.*. Bend loss in all-solid bandgap fibres[J]. Opt Express, 2006, 14(12): 5688–5698.
- 25 FiberLabs. Fluoride fibers instock[OL]. <http://www.fiberlabs-inc.com/fiber-stock.htm>(2014).

栏目编辑: 王晓琰