

DOI:10.16136/j.joel.2023.01.0239

大模场面积低正常色散的同轴双芯光纤

李培鑫^{1,2}, 王春灿^{1,2*}, 杜志勇^{1,2}

(1. 北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044; 2. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 为设计具有大模场面积和正常色散的光纤, 提出了一种新型的同轴双芯光纤。通过在中心纤芯内引入空气孔, 光纤能够拥有红移的零色散波长和提升的有效模场面积。进一步分析了光纤参数对光纤群速度色散和有效模场面积的影响。据此分别设计了具有三种不同参数条件的光纤, 光纤具有宽带的正常色散工作区域, 可分别覆盖 1 400—1 800 nm, 1 700—2 000 nm, 2 000—2 300 nm, 具有大于 $-5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的群速度色散, 有效模场面积可高达 $296 \mu\text{m}^2$ 。提出的光纤在高功率超短脉冲光纤激光源中具有潜在的应用价值。

关键词: 光纤光学; 正常色散; 大模场面积; 双芯光纤

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)01-0010-09

Large-mode-area coaxial-dual-core fiber with low normal dispersion

LI Peixin^{1,2}, WANG Chuncan^{1,2*}, DU Zhiyong^{1,2}

(1. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For the purpose of realizing the large-mode-area fibers with low normal dispersion, a novel coaxial-dual-core fiber is proposed. By introducing an air hole in the enter core, the fiber can process a red-shifted zero dispersion wavelength as well as an increased effective mode area. The influence of fiber parameters on the group velocity dispersion and effective mode area is further explored. As a result, the designed fibers with three different choices of parameter conditions can operate in the broadband normal-dispersion wavelength regions, which cover 1 400—1 800 nm, 1 700—2 000 nm and 2 000—2 300 nm, respectively. The group velocity dispersion profiles exhibit low and flat shapes with values more than $-5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, while the effective mode areas can reach up to $296 \mu\text{m}^2$. The proposed coaxial-dual-core fiber has potential applications in high-power ultrashort-pulse fiber laser sources.

Key words: fiber optics; normal dispersion; large-mode-area; dual-core fiber

0 引言

高功率超短脉冲光纤激光源由于具有结构紧凑、散热性能好、输出光束质量高等特点, 近年来在国防、工业和医疗等众多应用领域受到广泛关注^[1]。传统的孤子被动锁模光纤激光器工作在反常色散条件下, 受孤子面积理论限制, 输出脉冲能

量一般在 pJ 量级^[2]。近年来提出的正常色散锁模光纤激光器, 可以生成具有线性啁啾特性的宽带耗散孤子和自相似脉冲, 有效避免了由于调制不稳定性或者孤子分裂对提升脉冲能量的限制作用, 从而获得 nJ 量级以上的脉冲能量^[3]。然而, 如果脉冲在谐振腔内积累过高的非线性相位, 会导致脉冲波形畸变甚至分裂, 从而限制了超短脉

* E-mail: chcwang@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-07 修订日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61575018)资助项目

冲能量的进一步提升^[4]。大模场面积光纤具有较低的非线性参数,可以有效提升超短脉冲在谐振腔内的能量容限^[5]。因此,研究大模场面积正常色散光纤,对于实现高能量超短脉冲全正常色散锁模光纤激光器具有重要的研究价值。目前,近红外波段的正常色散光纤主要包括:高数值孔径小芯径光纤^[6]、高掺锗石英多包层结构光纤^[7]、以及掺锗纤芯的光子晶体光纤等^[8]。然而上述光纤的模场面积较小,无法有效降低光纤的非线性参数,尤其对于掺铒和掺铥光纤激光器,还需要把光纤的零色散波长从石英材料的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 红移至 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 乃至 $1.9\text{ }\mu\text{m}$ 波长以外,从而增加了研究大模场面积正常色散光纤的难度。最近,PRABHAKAR等提出在同轴双芯光纤的内包层区域引入两层空气孔,从而在C波段实现了一 $860\text{—}200\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的正常色散,模场面积约为 $67\text{ }\mu\text{m}^2$ ^[9]。BASKIOTIS等^[10]基于不对称多芯光纤结构,在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 波长处实现了一 $200\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的正常色散,同时具有 $340\text{ }\mu\text{m}^2$ 的模场面积。然而,对于超短脉冲锁模光纤激光器,增大腔内净色散会导致脉冲时域宽度增加,频谱带宽降低。因此,具有低且平坦正常色散特性的大模场面积光纤更适用于超短脉冲光纤激光器^[11]。

本文提出了一种新型的同轴双芯光纤,可以分别在 $1400\text{—}1800\text{ nm}$, $1600\text{—}2100\text{ nm}$ 和 $1900\text{—}2300\text{ nm}$ 波段获得近零的正常色散特性,同时光纤有效模场面积高于 $75.4\text{ }\mu\text{m}^2$,光纤的色散和非线性参数均明显低于普通色散补偿光纤,为进一步提升超短脉冲能量提供了一种新的方法。

1 光纤结构和基本理论

如图1所示,本文在同轴双芯光纤结构中引入中心空气孔, r_1 和 r_2 表示空气孔和内芯的半径, r_3 和 r_4 为环芯的内外半径。 n_1 和 n_2 分别表示内外纤芯的折射率,对应的掺锗浓度分别为 X_1 和 X_2 , n_0 和 n_{air} 分别为纯石英和空气的折射率。

光纤的色散 $D(\lambda)$ 计算方法如下:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

式中: λ 为波长, n_{eff} 为光纤模式的有效折射率,可以利用全矢量有限元软件 Comsol 求解得到, c 为真空中的光速。计算过程需要考虑材料色散,掺锗石英材料的 Sellmeier 公式如下^[12]:

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + X(GA_i - SA_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [S1_i + X(G1_i - S1_i)]^2}, \quad (2)$$

式中: $n(\lambda)$ 为掺锗石英折射率, SA_i , Sl_i , GA_i 和 Gl_i 分别对应 SiO_2 和 GeO_2 材料的 Sellmeier 系数, X 为

GeO_2 的掺杂浓度(单位是 mol%)。另外,光纤有效模场面积 A_{eff} 计算如下:

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

式中, $|F(x,y)|$ 为光纤模式强度在 (x,y) 截面内的分布。

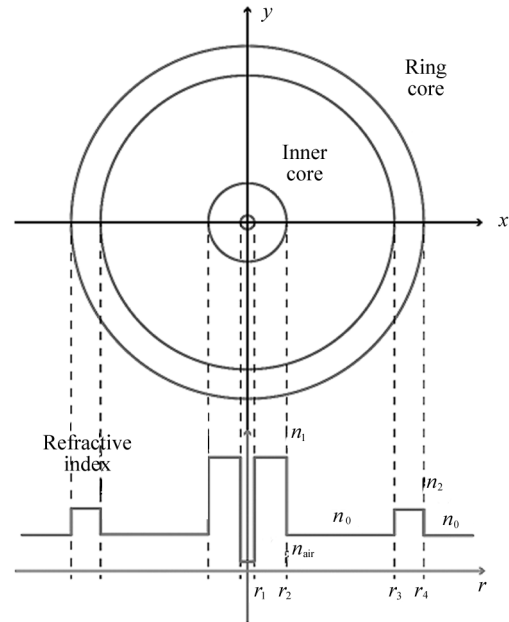


图1 引入中心空气孔同轴双芯光纤的横截面及折射率随半径分布

Fig. 1 Cross section of the coaxial-dual-core fiber with the center air-hole and its refractive-index distribution with the radius

图2针对单个纤芯情况(即仅包含内纤芯),对比了光纤加入空气孔前后的基模色散和模场面积。可以看出,纤芯空气孔半径从0增大到 $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 时,光纤的零色散波长由 1290 nm 红移至 1590 nm ;同时,从图(c)–(g)的基模模场分布可以看出,相同的纤芯半径和折射率条件下,增大空气孔半径使得基模模场分布向包层扩散,从而导致 1550 nm 波长处的有效模场面积从 $59.5\text{ }\mu\text{m}^2$ 提高到 $137.7\text{ }\mu\text{m}^2$ 。

由单纤芯分析结果可见,引入空气孔不仅可以调整光纤的群速度色散、拓宽正常色散工作波长范围,同时可以提升有效模场面积。因此,可以在同轴双芯光纤的基础上引入空气孔以改善光纤色散及模场面积特性。若光纤不引入空气孔,即 $r_1=0$,则非对称双芯之间的耦合作用会导致光纤在C波段

(1530—1565 nm)具有较高的正常色散特性^[13]。根据耦合模理论,可以把同轴双芯光纤的内外纤芯看成两个相对独立的光波导,当内外光波导中的基模

满足相位匹配条件时(即基模有效折射率在相位匹配波长 λ_p 处相等),基于耦合作用形成的超模在相位匹配波长附近会呈较大的群速度色散。

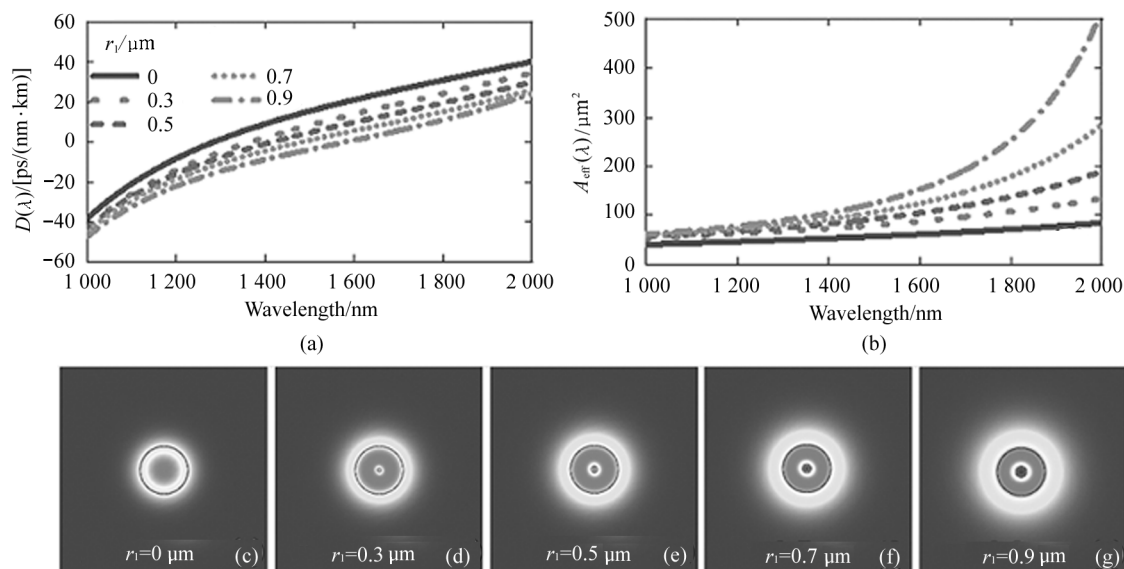


图2 单个纤芯光纤引入空气孔前后的群速度色散和有效模场面积:不同空气半径 r_1 条件下光纤基模的

(a)群速度色散曲线,(b)有效模场面积曲线,

图(c)–(g)分别为不同空气孔 r_1 半径下,1550 nm波长光纤基模对应的模场分布图, $r_2 = 4 \mu\text{m}$, $X_1 = 5 \text{ mol}\%$

Fig. 2 Group velocity dispersion and effective mode area of the single-core fiber with and without the air hole;

(a) curves of group velocity dispersion and (b) corresponding effective mode area of the fundamental modes

in the fiber with different air-hole-core radius r_1 ; (c)–(g) the intensity distributions of the fundamental modes

at 1550 nm in the fiber with different r_1 , where $r_2 = 4 \mu\text{m}$ and $X_1 = 5 \text{ mol}\%$

表1 3种不同群速度最大绝对值的同轴双芯光纤结构参数

Tab. 1 Structural parameters of coaxial-dual-core fibers with three different maximum absolute values of group velocity dispersions

Types of the coaxial-dual-core fiber	Air hole radius $r_1/\mu\text{m}$	Core distance $d_{\text{space}}/\mu\text{m}$	Ring core width $d_{\text{ring}}/\mu\text{m}$
A1	0.00	10.00	6.00
A2	0.00	14.00	6.00
A3	0.00	18.00	6.00
B1	0.70	14.00	2.26
B2	0.70	21.00	2.28
B3	0.70	27.00	2.28

光纤结构参数取值如表1所示,A1—A3和B1—B3分别表示没有引入和引入空气孔的同轴双芯光纤。其中 X_1 和 X_2 固定为5 mol%和4 mol%,以保持材料色散一致;光纤B1、B2和B3在空气孔半径 r_1 为0.7 μm , r_2 为4 μm 的条件下,通过调整纤芯间距 d_{space} 和环芯宽度 d_{ring} (即 r_4 与 r_3 的差),使得与

光纤A1、A2和A3分别具有相近的相位匹配波长和最大群速度色散绝对值。

为了对比同轴双芯光纤引入空气孔前后的特性,图3显示了3组具有不同光纤群速度色散最大绝对值和对应的有效模场面积曲线。

如图3(a)、(c)、(e)所示,光纤A1、A2和A3的相位匹配波长分别为1550 nm、1560 nm和1563 nm,随纤芯间距 d_{space} 的增加(分别为10 μm 、14 μm 和18 μm)而红移,同时由于耦合强度变弱,光纤在相位匹配波长 λ_p 处的群速度色散值随之降低,分别为−85.1 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,−496 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和−2067 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。对于引入空气孔光纤B1、B2和B3,通过调整参数 d_{space} 和 d_{ring} 可以获得与光纤A1、A2和A3相近的相位匹配波长和群速度色散。

但是对比图3(b)、(d)、(f)可以发现,引入空气孔后光纤的有效模场面积在整个波长范围内获得提高。例如,光纤B1、B2和B3在各自相位匹配波长处

的模场面积分别为 $275.1 \mu\text{m}^2$, $347.7 \mu\text{m}^2$ 和 $268.1 \mu\text{m}^2$, 远大于光纤 A1, A2 和 A3 对应的有效模场面积 $174.1 \mu\text{m}^2$, $175.8 \mu\text{m}^2$, $116.6 \mu\text{m}^2$ 。因此, 通过在同轴双芯光纤中引入空气孔, 一方面可以提升有效模场面积; 另一方面能够调整光纤的色散特性。对于本文研究的低正常色散光纤, 可以利用空气孔尺寸的改变优化光纤色散特性, 从而增强了光纤设计的灵活性。

光纤损耗是光纤的一项重要指标, 其总损耗 α_{total} 主要由 3 部分组成, 根据下式计算^[14]:

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{R}} + \alpha_{\text{IR}} + \alpha_{\text{CON}} = \frac{1}{\lambda^4} \sum_i A_i \Gamma_i + \sum_i B_i \exp\left(-\frac{b_i}{\lambda}\right) + \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (4)$$

$$\Gamma_i = \iint P_i(x, y) dx dy / \iint P(x, y) dx dy, \quad (5)$$

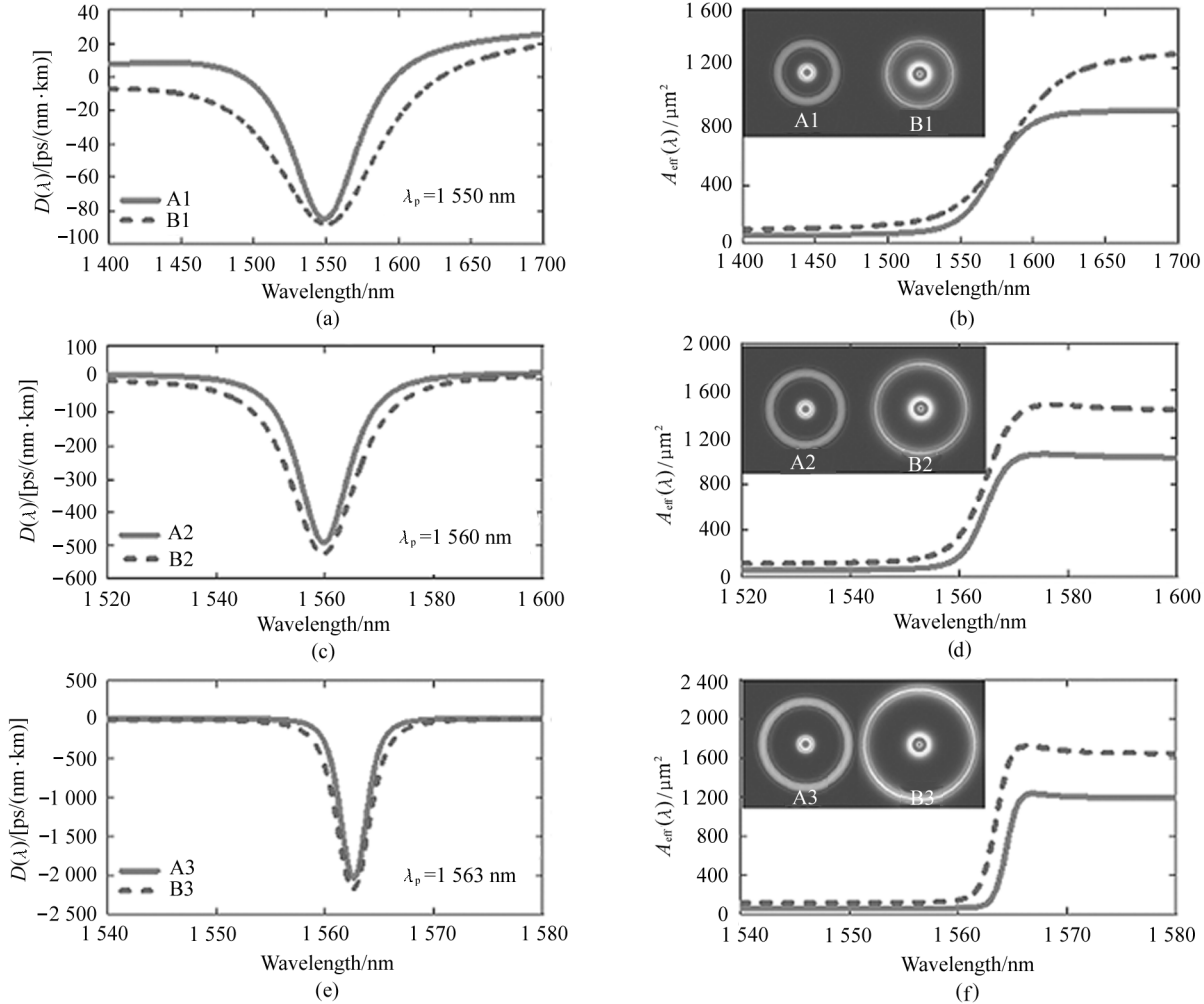


图3 有无空气孔情况下, 具有 3 种不同群速度色散最大绝对值的同轴双芯光纤特性:

(a)(c)(e) 不同光纤类型的群速度色散曲线, 和 (b)(d)(f) 相应的有效模场面积曲线;

(a)(b) 对应相位匹配波长 λ_p 为 1550 nm 的光纤 A1 和 B1;

(c)(d) 对应相位匹配波长 λ_p 为 1560 nm 的光纤 A2 和 B2;

(e)(f) 对应相位匹配波长 λ_p 为 1563 nm 的光纤 A3 和 B3; 插图为同轴双芯光纤相位匹配波长处的光纤基模模场强度分布

Fig. 3 Characteristics of the coaxial-dual-core fibers with three different maximum absolute values of group velocity dispersions in the cases with and without air holes: (a)(c)(e) curves of group velocity dispersions and (b)(d)(f) corresponding curves of effective mode areas for the fiber types; (a)(b) A1 and B1 with λ_p of 1550 nm, (c)(d) A2 and B2 with λ_p of 1560 nm, and (e)(f) A3 and B3 with λ_p of 1563 nm, where the insets show the intensity distributions of the fundamental modes of the coaxial-dual-core fibers at phase matching wavelengths

式中, α_R 为瑞利散射损耗, 角标 i 表示光纤中的第 i 个区域, 不同区域具有不同的材料, A_i 为第 i 个区域相应材料的瑞利散射系数; Γ_i 为第 i 区域的功率填充因子, 可以由式(5)计算得到, 其中 $P_i(x, y)$ 为第 i 区域模式功率分布, $P(x, y)$ 为整个光纤截面模式功率分布; α_{CON} 表示限制损耗, α_{IR} 为红外吸收损耗, B_i 和 b_i 为 i 对应区域材料的常数, 掺杂浓度对其影响较弱^[14]。

2 数值计算及结果分析

正常色散光纤传输超短光脉冲有利于避免高阶孤子分裂, 尤其对于高峰值功率超短光脉冲, 增大有效模场面积且降低群速度色散有利于减弱光纤非线性色散导致的脉冲畸变。因此为了进一步探究本文提出的光纤特性, 计算分析了光纤参数对于基模色散和有效模场面积的影响。

2.1 光纤尺寸参数变化对光纤色散和有效模场面积的影响

首先, 如图 4(a) 所示, 适当增大空气孔半径 r_1

可以使光纤的零色散波长从 1 290 nm 向长波长平移。当 r_1 为 0.7 μm 时, 光纤零色散波长为 1 800 nm, 并且在 1 200—1 800 nm 波长范围内群速度色散绝对值小于 20 ps/(nm·km)。当空气孔半径继续增加至 0.9 μm 时, 由于内芯基模的有效折射率进一步降低, 导致相位匹配波长 λ_p 蓝移, 从而使得零色散波长减小至 1 720 nm, 群速度色散绝对值最高达到 24.8 ps/(nm·km)。另外, 如图 4(b) 所示, 光纤的有效模场面积随空气孔半径的增加而明显提高, 当 $r_1=0.9 \mu\text{m}$ 时, 有效模场面积在 1 600 nm 波长处可以达到 225.6 μm^2 , 远大于没有引入空气孔 ($r_1=0 \mu\text{m}$) 时 67.8 μm^2 的有效模场面积。其次, 当半径 r_2 从 3.8 μm 增加至 4.0 μm , 同时保持光纤其他参数不变时, 内芯基模有效折射率的增大导致相位匹配波长 λ_p 红移, 如图 5(a) 所示。当半径 r_2 增加至 4.0 μm 时, 由于耦合所致的正常色散绝对值与反常材料色散相近, 从而在波长范围 1 400—1 700 nm 内获得近零且平坦的正常色散特性, 此时零色散波长为 1 800 nm。如图 5(b) 所示, 同样由于相位匹配波

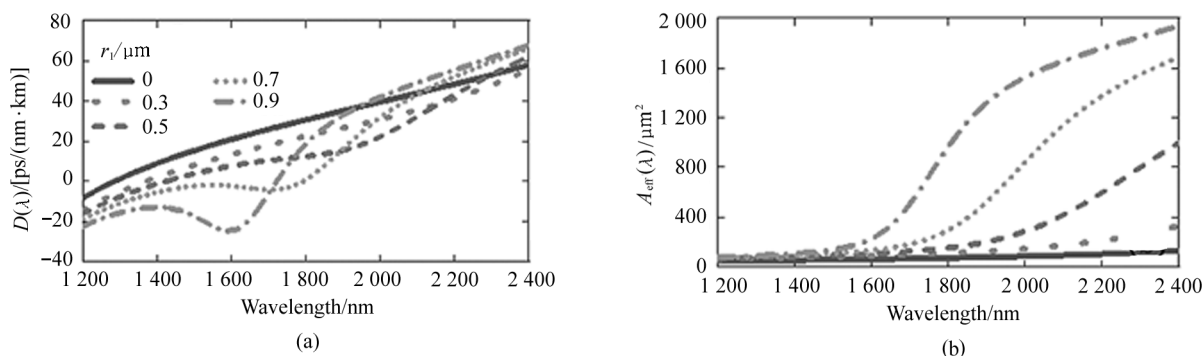


图 4 空气孔半径 r_1 对光纤特性的影响: (a) 群速度色散曲线; (b) 有效模场面积曲线, 波长范围 1 200—2 400 nm, 参数取值: $r_2=4 \mu\text{m}$, $r_3=15 \mu\text{m}$, $r_4=18 \mu\text{m}$, $X_1=5 \text{ mol}\%$ 和 $X_2=2 \text{ mol}\%$

Fig. 4 Influence of r_1 on the fiber characteristics; (a) curves of the group velocity dispersions and (b) effective mode areas at 1 200—2 400 nm, where the other parameters are $r_2=4 \mu\text{m}$, $r_3=15 \mu\text{m}$, $r_4=18 \mu\text{m}$, $X_1=5 \text{ mol}\%$, and $X_2=2 \text{ mol}\%$

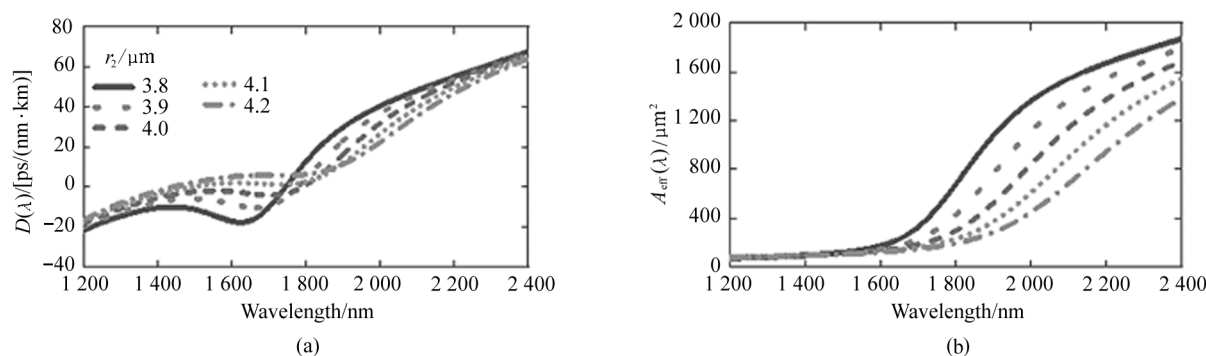


图 5 空气孔纤芯半径 r_2 对光纤特性的影响: (a) 群速度色散曲线; (b) 有效模场面积曲线, 波长范围 1 200—2 400 nm, 参数取值: $r_1=0.7 \mu\text{m}$, $r_3=15 \mu\text{m}$, $r_4=18 \mu\text{m}$, $X_1=5 \text{ mol}\%$, $X_2=2 \text{ mol}\%$

Fig. 5 Influence of r_2 on the fiber characteristics; (a) curves of the group velocity dispersions and (b) effective mode areas at 1 200—2 400 nm, where the values of parameters are $r_1=0.7 \mu\text{m}$, $r_3=15 \mu\text{m}$, $r_4=18 \mu\text{m}$, $X_1=5 \text{ mol}\%$ and $X_2=2 \text{ mol}\%$

长随 r_2 增大红移的原因,虽然 $r_2=4.2\text{ }\mu\text{m}$ 时光纤具有更大的纤芯半径,但是在 1600 nm 波长处,有效模场面积为 $121.7\text{ }\mu\text{m}^2$,小于 $r_2=3.8\text{ }\mu\text{m}$ 时的 $172.2\text{ }\mu\text{m}^2$ 。

最后,图6和图7分别分析了外层环芯纤芯内外半径 r_3 和 r_4 的变化对光纤色散和有效模场面积的影响。

如图6(a)和7(a)所示, r_3 的增大和 r_4 的减小均可以导致环芯模式有效折射率的降低,使得两纤芯之间的相位匹配波长发生红移。相反, r_3 的减小和 r_4 的增大使外层纤芯模式有效折射率增加,此时相位匹配波长蓝移。因此,当参数 (r_3, r_4) 取值为 $(14, 18)\text{ }\mu\text{m}$ 和 $(15, 19)\text{ }\mu\text{m}$ 时,在相位匹配波长 1600 nm 附近能够获得高群速度色散和有效模场面积。

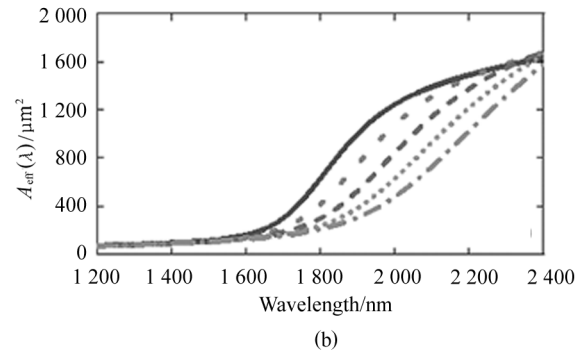
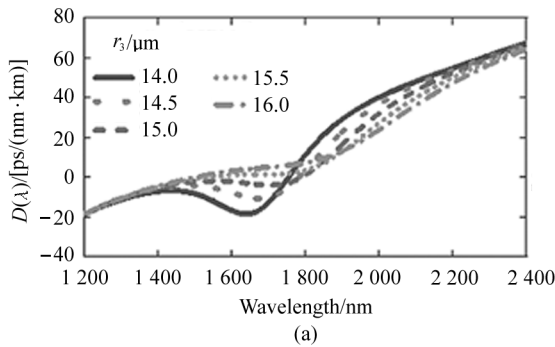


图6 环芯内径 r_3 对光纤特性的影响:(a) 群速度色散曲线;(b) 有效模场面积曲线, 波长范围 $1200\text{—}2400\text{ nm}$, 参数取值:

$$r_1=0.7\text{ }\mu\text{m}, r_2=4\text{ }\mu\text{m}, r_4=18\text{ }\mu\text{m}, X_1=5\text{ mol}\%, X_2=2\text{ mol}\%$$

Fig. 6 Influence of r_3 on the fiber characteristics:(a) curves of the group velocity dispersions and (b) effective mode areas at $1200\text{—}2400\text{ nm}$, where the values of parameters are

$$r_1=0.7\text{ }\mu\text{m}, r_2=4\text{ }\mu\text{m}, r_4=18\text{ }\mu\text{m}, X_1=5\text{ mol}\% \text{ and } X_2=2\text{ mol}\%$$

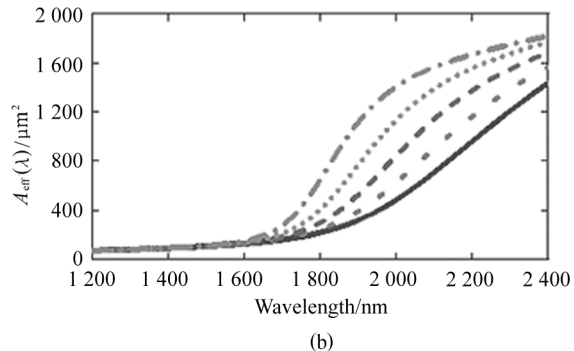
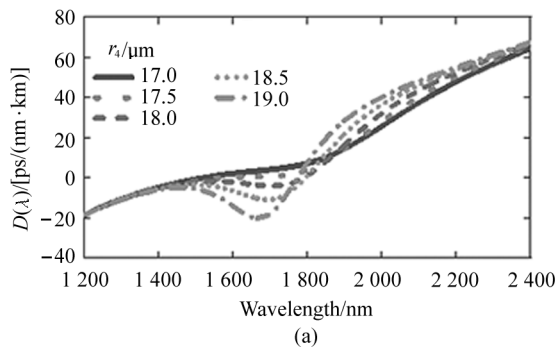


图7 环芯外径 r_4 对光纤特性的影响:(a) 群速度色散曲线;(b) 有效模场面积曲线, 波长范围 $1200\text{—}2400\text{ nm}$, 参数取值:

$$r_1=0.7\text{ }\mu\text{m}, r_2=4\text{ }\mu\text{m}, r_3=15\text{ }\mu\text{m}, X_1=5\text{ mol}\%, X_2=2\text{ mol}\%$$

Fig. 7 Influence of r_4 on the fiber characteristics:(a) curves of the group velocity dispersions and (b) effective mode areas at $1200\text{—}2400\text{ nm}$, where the values of parameters are

$$r_1=0.7\text{ }\mu\text{m}, r_2=4\text{ }\mu\text{m}, r_3=15\text{ }\mu\text{m}, X_1=5\text{ mol}\% \text{ and } X_2=2\text{ mol}\%$$

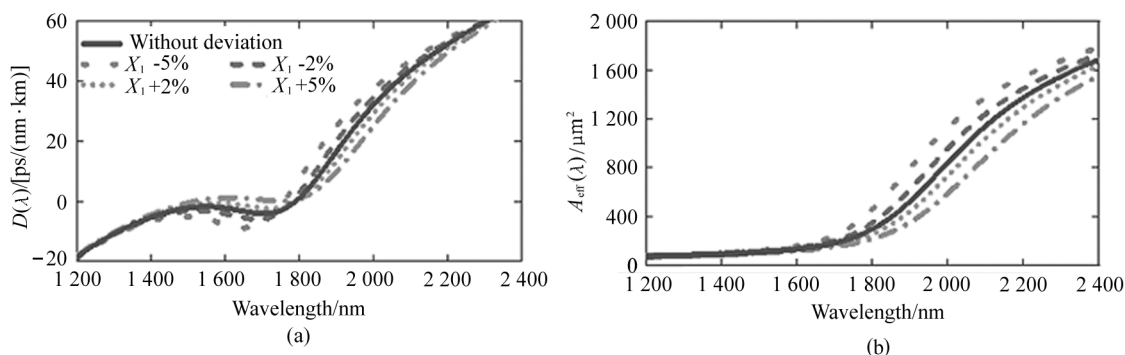


图8 掺锗浓度 X_1 对光纤特性的影响:(a) 群速度色散曲线;(b) 有效模场面积曲线,波长范围 1 200—2 400 nm,

参数取值: $r_1=0.7\ \mu\text{m}$, $r_2=4\ \mu\text{m}$, $r_3=15\ \mu\text{m}$, $r_4=18\ \mu\text{m}$, $X_1=5\ \text{mol}\%$, $X_2=2\ \text{mol}\%$

Fig. 8 Influence of the X_1 on the fiber characteristics: (a) curves of the group velocity dispersions and (b) effective mode areas at 1 200—2 400 nm, where the values of parameters are $r_1=0.7\ \mu\text{m}$, $r_2=4\ \mu\text{m}$, $r_3=15\ \mu\text{m}$, $r_4=18\ \mu\text{m}$, $X_1=5\ \text{mol}\%$, $X_2=2\ \text{mol}\%$

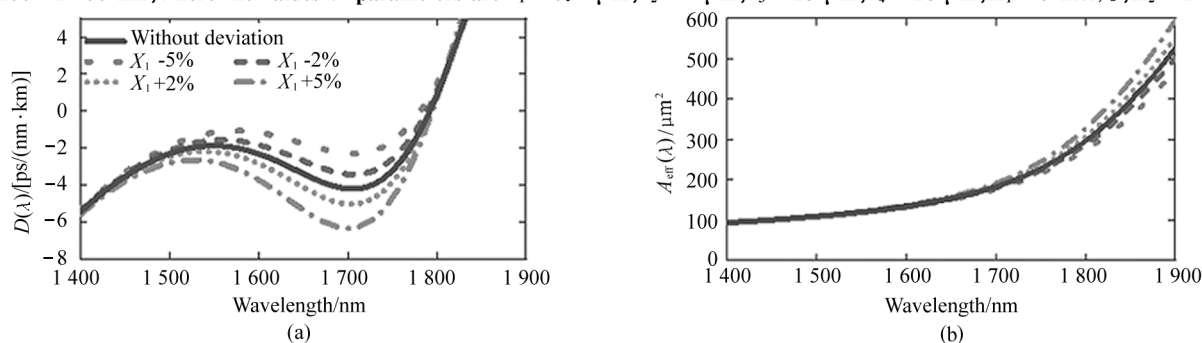


图9 掺锗浓度 X_2 对光纤特性影响:(a) 群速度色散曲线;(b) 有效模场面积曲线,波长范围 1 400—1 900 nm,

参数取值: $r_1=0.7\ \mu\text{m}$, $r_2=4\ \mu\text{m}$, $r_3=15\ \mu\text{m}$, $r_4=18\ \mu\text{m}$, $X_1=5\ \text{mol}\%$, $X_2=2\ \text{mol}\%$

Fig. 9 Influence of the X_2 on the fiber characteristics: (a) curves of the group velocity dispersions and (b) effective mode areas at 1 400—1 900 nm, where the values of parameters are $r_1=0.7\ \mu\text{m}$, $r_2=4\ \mu\text{m}$, $r_3=15\ \mu\text{m}$, $r_4=18\ \mu\text{m}$, $X_1=5\ \text{mol}\%$, $X_2=2\ \text{mol}\%$

2.3 正常色散波段的扩展

针对引入空气孔的同轴双芯光纤,通过结构参数设计可以实现3种不同的零色散波长,分别为 1 800 nm, 2 100 nm 和 2 300 nm。3 种光纤结构分别表示为类型 C1、C2 和 C3,相应的光纤参数由表 2 给出。如图 10(a)和 10(b)所示,在 1 400—1 800 nm 波长范围内,光纤基模具有平坦的正常色散特性,群速度色散在 0—5 ps/(nm·km)之间;同时,光纤有效模场面积从波长 1 400 nm 的 93.1 μm^2 增加至零色散波长 1 800 nm 的 295.8 μm^2 ,原因可以从图 10

(b)中的插图看出,即随波长增加,模场分布逐渐由内纤芯扩展到外层纤芯。

另外,如图 10(c)—(f)所示,光纤 C2 和 C3 分别在 1 600—2 100 nm 和 1 900—2 300 nm 波长范围内具有平坦的正常色散特性,且该波段有效模场面积分别为 75.4—280.0 μm^2 和 84.3—225.6 μm^2 。3 组不同参数光纤的损耗谱由图 11 所示。可以看出光纤在 1 000—2 100 nm 波段内总损耗 α_{total} 均小于 0.1 dB/m,在 2 100—2 300 nm 波段光纤损耗因石英材料的红外吸收作用增大到 1 dB/m。

表2 引入中心空气孔的同轴双芯光纤参数

Tab. 2 Parameters of the coaxial-dual-core fibers with the center air-hole

Types of the coaxial-dual-core fiber	Air hole radius $r_1/\mu\text{m}$	Inner core radius $r_2/\mu\text{m}$	Ring core inner diameter $r_3/\mu\text{m}$	Ring core outer diameter $r_4/\mu\text{m}$	Inner core Ge-doped concentration $X_1/\text{mol}\%$	Ring core Ge-doped concentration $X_2/\text{mol}\%$
C1	0.70	4.00	15.00	18.00	5.00	2.00
C2	0.80	3.40	16.00	18.00	9.00	3.00
C3	0.90	3.20	16.00	18.00	13.00	3.00

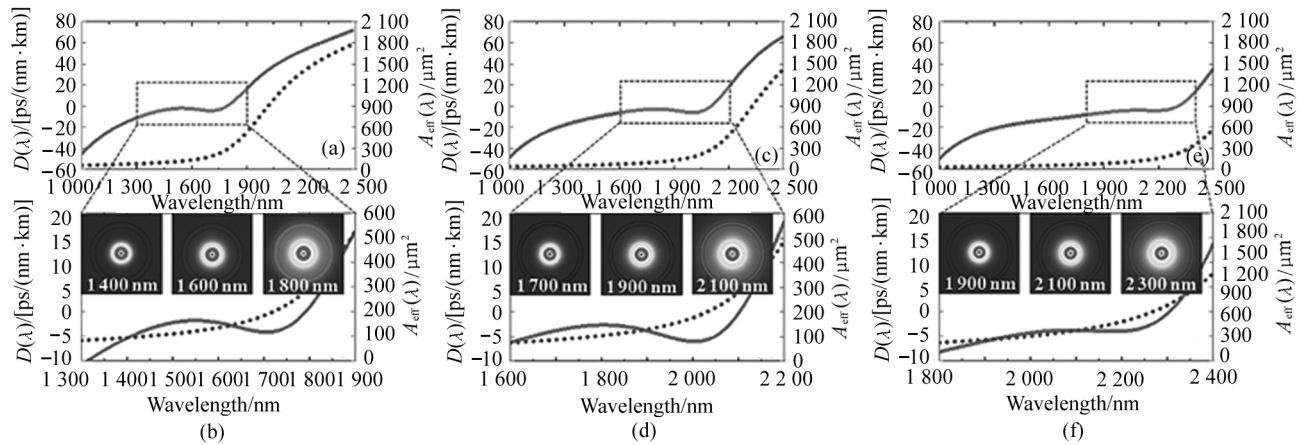


图 10 光纤的特性,群速度色散(实线)和有效模场面积(虚线)在波长范围:

C1 光纤(a) 1000—2 500 nm 和(b) 1 300—1 900 nm;

C2 光纤(c) 1 000—2 500 nm 和(d) 1 600—2 200 nm;C3 光纤(e) 1 000—2 500 nm 和

(f) 1 800—2 400 nm;插图为对应波长基模模场强度分布

Fig. 10 Characteristics of the fibers, curves of group velocity dispersion (solid line) and effective mode area (dashed line) in the wavelength ranges of (a) 1 000—2 500 nm and (b) 1 300—1 900 nm for the fiber C1; (c) 1 000—2 500 nm and (d) 1 600—2 200 nm for the fiber C2; (e) 1 000—2 500 nm and (f) 1 800—2 400 nm for the fiber C3, where the insets show intensity distributions of the fundamental modes at the corresponding wavelengths

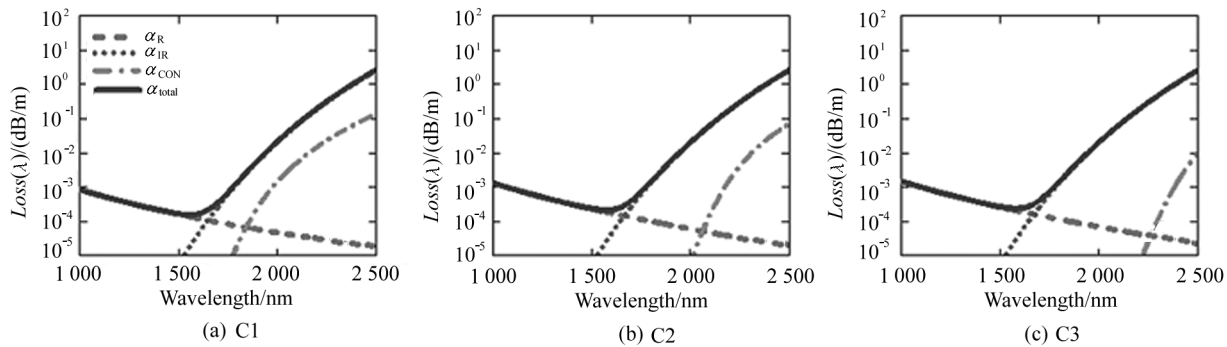


图 11 光纤损耗随波长变化

Fig. 11 The fiber losses versus wavelengths

3 结 论

本文提出在同轴双芯光纤的内纤芯中引入空气孔,以获得具有宽带正常色散特性的大模场面积光纤。首先,针对单纤芯情况的分析结果表明,在光纤纤芯中引入空气孔可以使零色散波长由 1 290 nm 红移至 1 590 nm,同时基模的有效模场面积获得提高。同轴双芯光纤结构主要用于实现色散补偿光纤,利用不对称双芯结构之间的耦合作用可以在 1 550 nm 波长区域获得小于 $-100 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的正常色散,同时由于芯径较小导致有效模场面积约 $20 \mu\text{m}^2$ 。本文在同轴双芯光纤中引入空气孔,一方面增强了设计光纤色散的自由度,另一方面可以增大内纤芯半径,从而提高有效模场面积。在分析光纤参数对光

纤色散影响的基础上,通过优化结构参数设计了 3 种不同工作波段的光纤:1 400—1 800 nm 波段、1 700—2 000 nm 波段和 1 900—2 300 nm 波段,具有小于 $-5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的平坦正常色散特性,且有效模场面积分别可以达到 $295.8 \mu\text{m}^2$, $280.0 \mu\text{m}^2$ 和 $225.6 \mu\text{m}^2$ 。最后,光纤在波长范围 1 000—2 100 nm 内总损耗低于 0.1 dB/m。

参考文献:

- [1] LIU Y Z, QIAO W C, GAO K, et al. Development of high-power ultrafast fiber laser technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201003.

刘一州,乔文超,高空,等.高功率超快光纤激光技术发展

- 展研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201003.
- [2] NELSON L E, JONES D J, TAMURA K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers[J]. *Applied Physics B*, 1997, 65(2): 277-294.
- [3] CHONG A, WRIGHT L G, WISE F W. Ultrafast fiber lasers based on self-similar pulse evolution: a review of current progress[J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society*, 2015, 78(11): 113901.
- [4] RENNINGER W H, CHONG A, WISE F W. Pulse shaping and evolution in normal-dispersion mode-locked fiber lasers[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2012, 18(1): 389-398.
- [5] LEFRANOIS S, KIEU K, DENG Y, et al. Scaling of dissipative soliton fiber lasers to megawatt peak powers by use of large-area photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1569-1571.
- [6] PIOTR C, ANUPAMAA R, ALEXANDER H, et al. Dispersion measurement of ultra-high numerical aperture fibers covering thulium, holmium, and erbium emission wavelengths[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35: 1301-1307.
- [7] WANG C C, WANG M H, WU J. Heavily germanium-doped silica fiber with a flat normal dispersion profile[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 1-10.
- [8] TARNOWSKI K, MARTYNKIEN T, MERGO P, et al. Coherent supercontinuum generation up to 2.2 μm in an all-normal dispersion microstructured silica fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30523.
- [9] PRABHAKAR G, PEER A, RASTOGI V, et al. Large-effective-area dispersion-compensating fiber design based on dual-core microstructure[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4505-4509.
- [10] BASKIOTIS C, HEIDT A M, ALAM S U, et al. LMA effectively single-mode thulium doped fibre with normal dispersion at wavelengths around 2 μm [C]//*IEEE Lasers & Electro-optics Europe*, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE, 2014: CJ-10-4.
- [11] LI P X, WANG C C, DU Z Y. The large-mode-area multicore fiber with low and flat normal dispersion profile at 1.5—2.3 μm [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 69: 102833.
- [12] FLEMING J W. Dispersion in GeO_2 - SiO_2 glasses[J]. *Applied Optics*, 1985, 23(24): 4486.
- [13] HSU J M, TSAI T Y. Solutions for modal squeeze in dual-concentric core photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 849-852.
- [14] LIU Y, YANG Z, JIAN Z, et al. Intrinsic loss of few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2107-2116.

作者简介:

王春灿 (1975—), 男, 博士, 教授, 硕士/博士生导师, 主要从事特种光纤和器件的设计, 超短脉冲光纤激光光源等方面的研究。