

耦合环辅助多模光纤受激布里渊散射阈值分析

关莉珍, 王雨行, 刘嘉伟, 聂鹏程, 闫煜鹏, 宋锡策, 余先伦

Analysis of the stimulated Brillouin scattering threshold of coupling ring-assisted multi-mode fiber

引用本文:

关莉珍, 王雨行, 刘嘉伟, 聂鹏程, 闫煜鹏, 宋锡策, 余先伦. 耦合环辅助多模光纤受激布里渊散射阈值分析[J]. [激光技术](#), 2024, 48(1): 60–64.

GUAN Lizhen, WANG Yuhang, LIU Jiawei, et al. Analysis of the stimulated Brillouin scattering threshold of coupling ring-assisted multi-mode fiber[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 60–64.

您可能感兴趣的其他文章

1. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 41–45.

2. 基于混合介质光纤干涉仪的单波长光纤激光器

引用本文: 姚琴芬, 鹿姚, 沈展羽, 等. 基于混合介质光纤干涉仪的单波长光纤激光器[J]. [激光技术](#), 2023, 47(6): 854–859.

3. 三谱线、高功率窄线宽纳秒光纤激光器

引用本文: 李川, 陈安涛, 赵文娟, 等. 三谱线、高功率窄线宽纳秒光纤激光器[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 753–756.

4. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器

引用本文: 朱志坚, 薛峻文, 王玉珂, 等. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 800–803.

5. 基于双向二级喇曼抽运的偏振控制研究

引用本文: 袁明, 秦祖军, 杨凯. 基于双向二级喇曼抽运的偏振控制研究[J]. [激光技术](#), 2016, 40(6): 860–865.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0060-05

耦合环辅助多模光纤受激布里渊散射阈值分析

关莉珍, 王雨行, 刘嘉伟, 聂鹏程, 闫煜鹏, 宋锡策, 余先伦*
(重庆三峡学院 电子与信息工程学院, 重庆 404020, 中国)

摘要: 为了降低模间串扰, 提出了一种耦合环辅助多模光纤结构, 通过仿真软件对其结构进行建模, 并建立了其受激布里渊散射增益谱的数学模型; 理论分析了耦合环辅助多模光纤的受激布里渊散射阈值以及光纤参量和模式对受激布里渊散射光谱阈值的影响, 并通过了仿真实验验证。结果表明, 耦合环辅助多模光纤增大关键模式有效折射率差值为原来的 1.75 倍, 可有效抑制模间串扰; 受激布里渊散射光谱阈值跟随光纤长度的增加, 从急剧下降变至缓慢, 最终在 18 km 处趋于定值 30 dBm; 在其它条件不变的情况下, 阈值随着衰减系数、纤芯的有效截面积和光纤模式阶数的增加呈线性关系增加, 随着纤芯半径的增加呈指数形式增长。该研究为提升光纤通信系统的传输距离和信道容量提供了理论参考。

关键词: 光通信; 阈值; 耦合环辅助; 受激布里渊散射; 多模光纤

中图分类号: TN253 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.010

Analysis of the stimulated Brillouin scattering threshold of coupling ring-assisted multi-mode fiber

GUAN Lizhen, WANG Yuhang, LIU Jiawei, NIE Pengcheng, YAN Yupeng, SONG Xice, YU Xianlun*
(School of Electronic and Information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404020, China)

Abstract: In order to reduce inter-mode crosstalk, a coupling ring-assisted multi-mode fiber structure was proposed, and the mathematical model of its excited Brillouin scattering gain spectrum was established. Theoretically, the excited Brillouin scattering threshold of the coupling ring-assisted multi-mode fiber was analyzed, as well as the effects of fiber parameters and modes on the excited Brillouin scattering spectral threshold. The results show that the coupling ring-assisted structure increases the effective refractive index difference to 1.75 times that of the conventional type step-index multi-mode fiber. The threshold of the excited Brillouin scattering spectrum in coupling ring-assisted multi-mode fiber follows the increase of the fiber length from a sharp decrease to a slow one and finally converges to a constant value of 30 dBm at 18 km, which is higher than that of the conventional step refractive index multi-mode fiber. Other things being equal, the threshold increases linearly with the attenuation coefficient, the effective cross-sectional area of the fiber core, and the mode order of the fiber; it increases exponentially with the increase of the core radius. This study provides a theoretical reference for enhancing the transmission distance and channel capacity of fiber optic communication systems.

Key words: optical communication; threshold; coupling ring-assisted; stimulated Brillouin scattering; multi-mode fiber

0 引言

面对网络传输时代更高速的规划需求及人们日益增长的带宽需求, 多模光纤因其得天独厚的容量优势, 可以解决单模光纤传输达到容量极限的问题, 将在未来光纤通信系统中发挥重要作用^[1-3]。但是多模光纤 (multi-mode fiber, MMF) 众多模式在传输过程中, 由于

受到外界各种环境、人为等因素干扰, 会发生模式耦合现象, 致使模式间发生串扰, 影响通信质量。近年来, 有很多通过对光纤结构进行设计以减少模式耦合提升光纤传输性能的相关研究, 如空心光纤、弱耦合少模多芯光纤、偏振光纤和沟槽辅助光纤等新类型^[4-12]。增大模式间有效折射率差值可以有效抑制串扰。

在整个光纤通信系统中, 当入射光功率超过一定值时, 会发生受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 现象^[13-14]。此现象是影响光纤传输系统中传输距离和容量的重要因素, 会限制系统入纤功率的提升。参考文献[15]中研究了多模光纤中 SBS 阈值的理论和数值研究, 但没有详细分析每种模式的

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFB3901405); 国家自然科学基金资助项目 (U2030116); 三峡库区地质环境监测与灾害预警重庆市重点实验室开放基金资助项目 (YB2020C0301)

* 通信作者: 839811547@qq.com

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-01-11

阈值。参考文献[16]中提出并测试了一种通过管理光纤声学轮廓来抑制 SBS 的新方法,发现具有 3 层不同掺杂纤芯的光纤结构对受激布里渊散射阈值可以有效提升。参考文献[17]中对阶跃折射率少模光纤的受激布里渊散射阈值进行了理论分析。参考文献[18]中通过频率和相位调制提高受激布里渊散射阈值是抑制光纤通信中 SBS 的有效方法,适用于在入射光功率有限的情况。参考文献[19]中在多模光纤中采用选择性模式激励抑制受激布里渊散射,发现通过优化多模激励,可以进一步提高 SBS 阈值。

基于此,本文作者优化设计了一种耦合环辅助多模光纤结构,建立了耦合环辅助多模光纤结构中 SBS 阈值的数学模型,理论分析并数值计算耦合环辅助多模光纤有效模场面积、不同阶数模式、衰减系数和纤芯半径对 SBS 阈值的影响,可以减少模式耦合,抑制模间串扰,且保持一定的模场面积。

1 耦合环辅助多模光纤结构

对于可以减少模间耦合现象的耦合环辅助多模光纤,需先确定其传输模式的具体表达式,常用归一化频率 $V = k_0 a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} = k_0 a n_{co} \sqrt{2\Delta n_{eff}}$ 来表征^[20]。其中, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 代表真空中的波数; λ 为入射光波长; a 为纤芯半径; n_{co} 、 n_{cl} 分别为纤芯和包层的折射率; Δn_{eff} 代表不同模式间有效折射率差值。在给定波长下,当 $V < 2.405$ 时,阶跃折射率多模光纤只可以传输基模,转化为单模光纤,若使阶跃折射率多模光纤传输多种模式,且使得下面所分析的模式都存在,应使得 $V > 7.588$ 。

模式耦合是影响多模光纤通信质量的重要因素之一,在多模光纤中加入耦合环辅助结构可以有效减少模式耦合现象,提升通信质量。本文中设计的耦合环辅助多模光纤结构的横截面示意图如图 1a 所示。该结构相比于普通的阶跃折射率多模光纤结构多了两部

分:纤芯中心和对称分布的耦合环,不同颜色代表不同折射率材料,其折射率分布图如图 1b 所示。图 1b 中, r_0 为中心低折射率耦合环半径, r_1 为中心耦合环外纤芯的外环半径, r_2 为高阶折射率耦合环的外环半径, r_{co} 为耦合环多模光纤的半径, n_{co} 为纤芯折射率, n_{w-} 为低折射率耦合环的折射率, n_{w+} 为高阶折射率耦合环的折射率, w_- 和 w_+ 分布为低折射率耦合环和高折射率耦合环的宽度, w 为两耦合环中间纤芯宽度。

通过仿真软件对多模光纤建模,发现 LP_{02} 和 LP_{21} 两个模式有效折射率最接近,是影响模间串扰的关键。采用有限元法计算耦合环辅助多模光纤与常规阶跃多模光纤 LP_{02} 与 LP_{21} 模式的有效折射率,变化如图 2 所示。把其在 1550 nm 处的差值 0.7×10^{-3} 与同环境下测得常规阶跃光纤的差值 0.4×10^{-3} 进行对比,发现两模式间有效折射率差值提升了 1.75 倍,验证了耦合环辅助多模光纤结构串扰抑制的有效性。

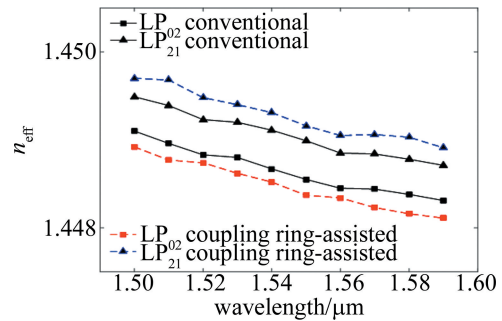


图 2 耦合环辅助多模光纤与常规阶跃多模光纤 LP_{02} 模和 LP_{21} 模有效折射率分布图

Fig. 2 Effective refractive index distribution of coupling ring-assisted multi-mode fiber and conventional step multimode fiber LP_{02} and LP_{21} modes

2 耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值理论模型

本文中通过常规多模光纤的 SBS 阈值模型,推导图 1 结构中 SBS 阈值理论模型。耦合环辅助多模光纤的布里渊增益谱服从洛伦兹分布,可以由布里渊频移、线宽和峰值增益系数等参量来描述。

布里渊频移不仅与散射光角度有关,且其值取决于光纤中传播光模式的有效折射率和相互作用的声模式的速度,耦合环的宽度及其折射率的改变都将引起传播光模式的有效折射率变化。在图 1 中,耦合环辅助多模光纤中的布里渊频移^[14]可以表示为:

$$\nu_B = \frac{2n_{eff}v}{\lambda} \sin(\theta/2) \quad (1)$$

式中: n_{eff} 是光纤中传输模式的有效折射率; v 为光纤中的声速; θ 为散射角。 ν_B 与散射角的关系为:布里渊

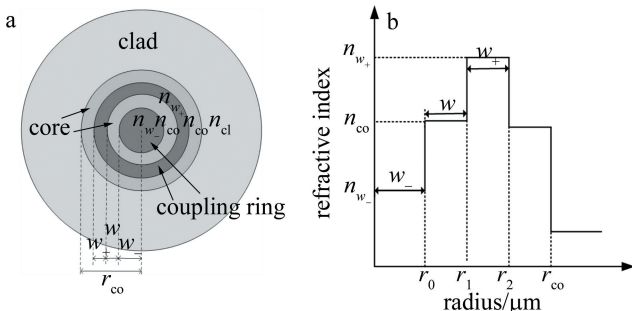


图 1 耦合环辅助多模光纤结构特征图

a—横截面示意图 b—折射率分布图

Fig. 1 Structure characteristics of coupling ring-assisted multi-mode fiber a—cross-sectional diagram b—refractive index distribution

频移在 $\theta = \pi$ 时得到最大值,定义为 $\nu_{B,\max}$;在 $\theta = 0$ 时得到最小值,定义为 $\nu_{B,\min}$ 。

图 1 中耦合环辅助多模光纤中所传输模式的布里渊散射谱线宽^[20]为:

$$\Delta\nu_B = \frac{16\pi^2 n_{\text{eff}}^2 \eta}{\lambda^2 \rho} \quad (2)$$

式中: $\Delta\nu_B$ 是布里渊散射谱的 3 dB 带宽,其值与光纤传播模式的有效折射率有关; ρ 是光纤材料密度; η 是运动粘滞系数。

耦合环辅助多模光纤可以有效减少多模光纤中的模式耦合现象,其布里渊散射增益谱^[20]为:

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{\Delta\nu_B/2}{\nu_{B,\max} - \nu_{B,\min}} \times \left[\arctan\left(\frac{\nu_{B,\max} - \nu}{\Delta\nu_B/2}\right) - \arctan\left(\frac{\nu_{B,\min} - \nu}{\Delta\nu_B/2}\right) \right] \quad (3)$$

式中: g_0 为纯石英布里渊峰值增益。当入射光与 Stokes 光的频率差 $\nu = \nu_B$ 时,布里渊散射谱的增益系数达到峰值,从式(3)得出其表达式^[21]为:

$$g_B = g_B(\nu_B) = \frac{2\pi^2 n_{\text{eff}}^7 p_{12}^2}{c\lambda^2 \rho \nu \Delta\nu_B} \quad (4)$$

式中: p_{12} 是光纤弹光系数; c 是真空中光速。

阈值增益系数不仅与耦合环辅助多模光纤的有效长度有关,还与光纤的有效截面积和耦合环辅助多模光纤纤芯半径等很多因素有关,其表达式^[17]为:

$$G \approx \ln \left[\frac{4A_{\text{eff}} \nu_B \sqrt{G'^3 \pi}}{g_0 k T \Gamma \nu_0 L_{\text{eff}}} \right] \quad (5)$$

式中:布里渊阈值增益系数 G 的临界值 $G' \approx 21$; k 为玻尔兹曼常量; T 为绝对温度; Γ 为声子衰减速率; ν_0 为抽运波频率。光纤的有效长度 L_{eff} 随着光纤长度 L 的变化与信号衰减系数 α 的关系表达式^[17]为:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (6)$$

图 1 中由于耦合环的加入,其纤芯的有效模横截面积 A_{eff} 有所变化,表达式为:

$$A_{\text{eff}} = S^2 \pi [r_{\text{co}}^2 - r_0^2 - (r_2^2 - r_1^2)] \quad (7)$$

式中: S 为图 1 中光纤模场面积与纤芯面积之比。多模光纤中 SBS 阈值的通用表达式^[17]为: $P_{\text{th}} = GA_{\text{eff}} / (g_B L_{\text{eff}})$ 。将式(7)代入,可得图 1 耦合环辅助多模光纤的 SBS 阈值表达式为:

$$P_{\text{th}} = \frac{GS^2 \pi [r_{\text{co}}^2 - r_0^2 - (r_2^2 - r_1^2)]}{g_B L_{\text{eff}}} \quad (8)$$

式中: r_0 为中心低折射率耦合环半径; r_1 为中心耦合环外纤芯的外环半径; r_2 为高阶折射率耦合环的外环半径; r_{co} 为耦合环辅助多模光纤的纤芯半径。

3 耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值数值研究

根据图 1 耦合环辅助多模光纤结构及其 SBS 阈值理论模型,数值计算研究光纤有效模场面积、不同阶数模式、衰减系数和纤芯半径对耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值的影响。本文中选定入射光波长为 1550 nm,光纤衰减常数 $\alpha = 0.22$ dB/km,纤芯折射率 $n_{\text{co}} = 1.46$,包层折射率 $n_{\text{cl}} = 1.4462$,纤芯直径 $d = 50 \mu\text{m}$,包层直径 $D = 125 \mu\text{m}$ 。

3.1 不同有效模场面积时,耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值与光纤长度的关系

在多模光纤中加入耦合环辅助结构可以有效抑制模式耦合现象,减少模间串扰,但同时会影响纤芯的有效模场面积。改变纤芯直径 d ,根据式(4)~式(8)数值计算,得到不同的有效模场面积下所测量的耦合环辅助多模光纤的 SBS 阈值,其值随光纤长度变化的情况如图 3 所示。

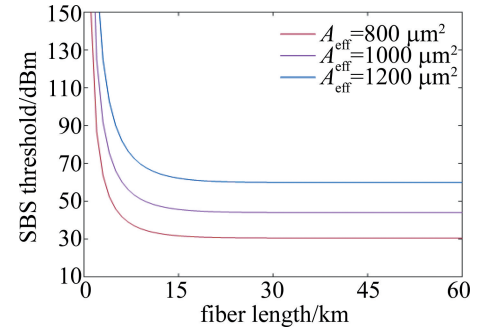


图 3 SBS 阈值随光纤长度的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of SBS threshold with fiber length

从图 3 可以看出,耦合环辅助多模光纤纤芯有效模场面积虽不同,但其 SBS 阈值随光纤长度的变化趋势相同,在 18 km 距离范围内从急剧下降变至缓慢,在 18 km 后趋于一个定值。同时可以看出,有效模场面积越大,其 SBS 阈值就越大,当纤芯直径在 $50 \mu\text{m} \sim 70 \mu\text{m}$ 之间时,其 SBS 阈值为 30 dBm~60 dBm。

3.2 耦合环辅助多模光纤各模式 SBS 阈值与光纤长度的关系

在图 1 耦合环辅助多模光纤中,选取 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{02} 、 LP_{31} 和 LP_{03} 6 种模式,通过有限元方法得到各模式有效折射率分别为:1.4506,1.4498,1.4491,1.4484,1.4475 和 1.4463,运用式(1)~式(4)、式(8)对其阈值进行数值计算,分析它们在不同光纤长度上

阈值的变化,结果如图 4 所示。

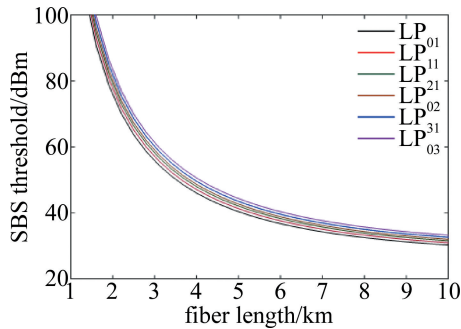


图 4 各模式 SBS 阈值与光纤长度的关系

Fig. 4 Relationship between SBS threshold value of each mode and fiber length

从图 4 可以看出,耦合环辅助多模光纤的 SBS 阈值会随着模式阶数的增大而增大。且在 10 km 的光纤长度内,SBS 阈值随着光纤长度的增加而减小,最终趋于 30 dBm。

3.3 耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值与衰减系数的关系

从式(6)可以看出,衰减系数与有效长度成反比,阈值又与有效长度成反比,故可知耦合环辅助多模光纤的 SBS 阈值与衰减系数成正比,其阈值会随着衰减系数的增大而增大。在一段长为 20 km 的光纤中,取阈值增益系数 $G=21$,对衰减系数与 SBS 阈值的关系进行数值计算,结果如图 5a 所示。可以看出,耦合环辅助多模光纤的 SBS 阈值随着光纤衰减系数的增大而增大,两者呈正比关系。

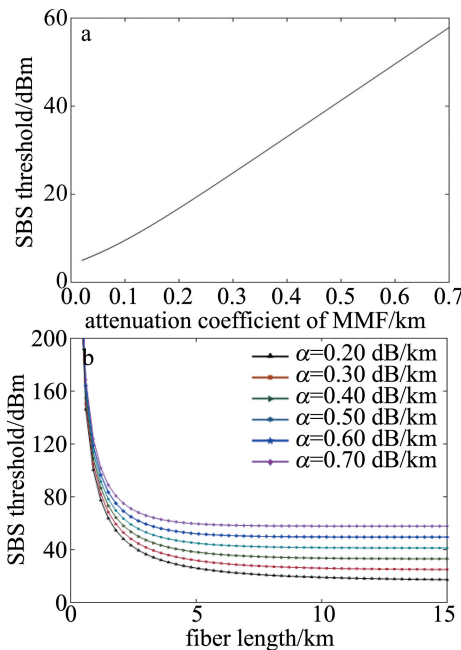


图 5 SBS 阈值与光纤衰减系数的关系的变化

Fig. 5 SBS threshold versus fiber attenuation coefficient

从图 5b 中可以看出,不同衰减系数的耦合环辅助

多模光纤 SBS 阈值随着光纤长度的增加,其阈值衰减速度逐渐变缓,且在趋于一个定值后,随着光纤衰减系数 α 从 0.20 dB/km 增至 0.70 dB/km,耦合环辅助多模光纤阈值从 20 dBm 增至 60 dBm,与如图 5a 中结果一致。

3.4 耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值与纤芯半径的关系

由式(4)~式(8)可知,耦合环辅助多模光纤纤芯半径与式(8)中的纤芯有效截面积和阈值增益系数都有关联。根据图 1 耦合环辅助光纤结构,在一段长为 20 km 的光纤中,改变最外环纤芯的半径大小,通过式(4)~式(8),数值计算纤芯半径的变化对于耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值的影响。

由图 6 可知,耦合环辅助阶跃多模光纤 SBS 阈值随着纤芯半径从 0 μm 增至 35 μm 几乎呈指数形式不断增加。

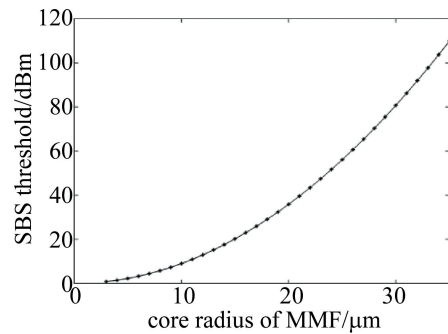


图 6 SBS 阈值与纤芯半径的关系

Fig. 6 Relationship between SBS threshold and core radius

4 结论

由于外界环境及光纤制作缺陷等因素,常规的阶跃型多模光纤在实际的传输中,模间串扰现象会严重影响通信质量。对于此种情况,本文作者设计了一种耦合环辅助多模光纤,优化光纤结构,提升最小模间折射率差值这个关键因素,最终增大差值为原来的 1.75 倍,平衡了抑制模间串扰与有效模场面积之间的关系。并依据设计的耦合环辅助多模光纤,从理论上和数值上分析光纤有效模场面积、不同阶数模式、衰减系数和纤芯半径对耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值的影响。通过数值计算得到:耦合环辅助多模光纤 SBS 阈值跟随着光纤长度的增加,从急剧下降变至缓慢,最终在 18 km 左右趋于定值 30 dBm;当光纤有效模场面积、不同阶数模式、衰减系数和纤芯半径等参量单个改变时,SBS 阈值会随着这些参量的增加而增加。这些规律性的变化可以在设计布里渊分布式光纤传感系统时,为提升系统有效长度和容量提供一定的理论依据。

参 考 文 献

- [1] RAMANIUK A, KACZOROWSKI J, NOWAKOWSKI P, *et al.* Advantages of using few-mode and multimode fibers in phase sensitive OTDR measurement system due to the modulation instability deferment [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 74: 103086.
- [2] LI Y Q, LIU Y R, WANG L. Research progress on Brillouin scattering effect in multimode optical fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(2): 10-15(in Chinese).
李永倩, 刘艳蕊, 王磊. 多模光纤布里渊散射效应研究进展[J]. *光通信技术*, 2021, 45(2): 10-15.
- [3] WANG Zh W, KONG Y, DING W, *et al.* Composite fiber is remotely sensitive to φ -OTDR vibration sensing[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 436-440(in Chinese).
王振伟, 孔勇, 丁伟, 等. 复合光纤对 φ -OTDR 振动传感远程敏感[J]. *激光技术*, 2021, 45(4): 436-440.
- [4] LI H, GUO Z L, YANG W T, *et al.* Research on multimode interferometric fiber level sensing technology with hollow core fiber[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(1): 120-124(in Chinese).
李虎, 郭子龙, 杨文婷, 等. 空芯光纤多模干涉型光纤液位传感技术研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(1): 120-124.
- [5] ZHANG J Q, ZHANG M, YIN J D, *et al.* Design of low loss hollow-core anti-resonance fiber for $3\mu\text{m}$ spectral region[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1723001(in Chinese).
张家强, 张敏, 尹金德, 等. $3\mu\text{m}$ 波段低损耗抗弯曲反谐振空芯光纤设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1723001.
- [6] DAI Y, WANG Y J, TIAN F, *et al.* Design and optimization of heterogeneous few-mode multi-core fiber with graded-index profile and trench/rod assisted [C]//2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). New York, USA: IEEE, 2020: 1-3.
- [7] GE D W, GAO Y Y, YANG Y, *et al.* A 6-LP-mode ultralow-modal-crosstalk double-ring-core FMF for weakly-coupled MDM transmission [J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 97-103.
- [8] LIU Ch, PEI L, XIE Y H, *et al.* Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106004 (in Chinese).
刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106004.
- [9] ZUO M Q, GE D W, LIU J X, *et al.* Long-haul intermodal-MIMO-free MDM transmission based on a weakly coupled multiple-ring-core few-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5868-5878.
- [10] LÜ H Zh, YU M X, ZHONG W B, *et al.* Research and design of low-loss photonic crystal fibers with large mode fields [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(2): 196-201(in Chinese).
吕欢祝, 余明芯, 钟文博, 等. 大模场低损耗光子晶体光纤的研究与设计[J]. *激光技术*, 2021, 45(2): 196-201.
- [11] QIU X, WU B J, LIU Y W, *et al.* Study on mode coupling characteristics of multimode magneto-optical fibers[J]. *Optics Communications*, 2020, 456: 124707.
- [12] ZHANG Z L, LU Y G, PAN Y H, *et al.* Trench-assisted multimode fiber used in Brillouin optical time domain sensors [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11396-11405.
- [13] LI Ch, CHEN A T, ZHAO W J, *et al.* Tri-spectral, high peak power narrow linewidth nanosecond fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(6): 753-756(in Chinese).
李川, 陈安涛, 赵文娟, 等. 三谱线、高功率窄线宽纳秒光纤激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 753-756.
- [14] LI T F, BA D X, ZHOU D W, *et al.* Recent progress in optical fiber sensing based on forward stimulated Brillouin scattering [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(9): 220021(in Chinese).
李天夫, 巴德欣, 周登望, 等. 前向受激布里渊散射光纤传感研究进展[J]. *光电工程*, 2022, 49(9): 220021.
- [15] LÜ H B, ZHOU P, WANG X L, *et al.* Theoretical and numerical study of the threshold of stimulated Brillouin scattering in multimode fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(21): 4464-4470.
- [16] KHUDYAKOV M M, LIKHACHEV M E, BUBNOV M M, *et al.* Three layer fiber with high stimulated Brillouin scattering threshold [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2017, 10083: 193-201.
- [17] CHEN W Ch, HU G J, LIU F W, *et al.* Threshold for stimulated Brillouin scattering in few-mode fibers [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(15): 4105-4110.
- [18] LEI P, ZHANG C B, XU M Y, *et al.* Manipulating stimulated Brillouin scattering produced gain near its threshold via slow intensity modulation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(5): 1-5.
- [19] CHEN C W, WISAL K, AHMADI P, *et al.* Suppressing stimulated Brillouin scattering by selective mode excitation in multimode fibers [C]//CLEO: QELS Fundamental Science. Washington DC, USA: Optica Publishing Group, 2022: FF2L. 3.
- [20] KASAHARA M, SAITOH K, SAKAMOTO T, *et al.* Design of three-spatial-mode ring-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1337-1343.
- [21] CHE X X, ZHAO L J, XU Zh N, *et al.* Research and comparison of Brillouin characteristics of single-mode fiber, few-mode fiber and multi-mode fiber [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1650(2): 022022.