

多模光纤不同传输模式的布里渊散射特性

赵丽娟, 车小霞, 徐志钮*, 王贺晴

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:针对多模光纤的分布式传感系统受多模光纤布里渊散射特性的影响,利用有限元仿真得到多模光纤6种典型传输模式的电场分布,并从布里渊频移、线宽、峰值增益和布里渊散射谱4个方面仿真研究了单一模式和模式叠加情况下多模光纤的布里渊散射特性。仿真结果表明:多模光纤不同传输模式的线宽和增益峰值都随着模式阶数的增加略有减少,布里渊频移随模式阶数减小而明显增加;在不受应变和温度影响的情况下,多模式叠加后布里渊散射谱相较单一模式线宽发生展宽,增益峰值大幅减小。

关键词:多模光纤;布里渊频移;线宽;增益峰值;布里渊散射谱

中图分类号:TN212.9 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)04-0043-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Brillouin scattering characteristics of different transmission modes in multimode fiber

ZHAO Lijuan, CHE Xiaoxia, XU Zhiniu*, WANG Heqing

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: Aiming at the distributed sensing system based on multimode fiber is affected by the Brillouin scattering characteristics of multimode fiber, this paper uses finite element simulation to obtain the electric field distributions of six typical transmission modes of multimode fiber, and the Brillouin scattering characteristics of multimode fiber under single mode and mode superposition are simulated and studied from four aspects: Brillouin frequency shift, linewidth, max gain and Brillouin scattering spectrum. The simulation results show that the linewidth and max gain of different transmission modes of multimode fiber decrease slightly with the increase of the mode order, while the Brillouin frequency shift decreases significantly with the decrease of the mode order. Unaffected by strain and temperature, the Brillouin scattering spectrum after mode superposition is broadened compared to the single mode linewidth, and the max gain is greatly reduced.

Key words: multimode fiber; Brillouin frequency shift; linewidth; max gain; Brillouin scattering spectrum

0 引言

与单模光纤相比,多模光纤可以传输很多模式,其布里渊散射参数随模式变化而发生改变,不同物理量引起不同模式布里渊散射参数的响应可能不同。因此,对多模光纤的不同传输模式的布里渊散射特性的研究

收稿日期:2019-09-28。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:51607066)资助;中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019MS090)资助。

作者简介:赵丽娟(1981—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为光纤通信与传感。现就职于华北电力大学电气与电子工程学院,从事教学和科学研究工作,负责完成和参与省部级、国家级项目6项,获得福建省科技进步一等奖1项(排名第2)。

*通信作者:徐志钮(Email: wzcjxx@163.com)。



极为重要。目前,文献[1-5]针对多模光纤布里渊谱、阈值和模式耦合测量方面开展了一定的研究,但对多模光纤不同模式的布里渊散射参数研究较少,未见从理论和建模分析的角度深入研究多模光纤中不同模式的布里渊散射特性的报道,这影响了基于多模光纤布里渊散射的分布式传感研究的深入开展。

本文系统地介绍光纤布里渊散射参数的计算方法,构造多模光纤的波导模型并在波动光学理论上利用有限元方法对多模光纤进行模式分析。

1 理论分析

1.1 光纤中的模式分析

在光纤的波导理论分析中,通过求解亥姆霍兹方

程满足边界条件的解,即可得到光纤中传输模场的解答。求解的方法主要有2种:标量近似解和矢量解。本文分析的多模光纤是阶跃型光纤,纤芯和包层的折射率都是均匀的,且两者的折射率差别极小,满足弱导波光纤的条件。因为弱导光纤中的模式基本上为线偏振波,因此把这种标量模记作线偏振 LP_{mn} 模^[6]。不失一般性,本文只讨论了电场沿 y 方向的 LP 模。在 LP_{mn} 模的表示法中 m 、 n 都有明确的物理意义,它们表示对应模式的场在光纤横截面上的分布规律, m 表示场沿圆周的最大值有几对, n 表示场沿半径最大值的个数。

1.2 光纤中的布里渊散射参数

布里渊散射是指 Stokes 光与泵浦光相互耦合作用而产生的一种非线性光散射现象。

1.2.1 单一模式

多模光纤每种传输模式都符合洛伦兹分布,且布里渊散射谱可用布里渊频移、线宽和增益峰值等参数描述^[7]。

◆布里渊频移。对于多模光纤来说,不同模式的光入射到光纤的角度不同,布里渊散射角也不同,所以计算布里渊频移时要考虑散射角的影响。因此布里渊频移计算公式为:

$$v_B = \frac{2n_{\text{eff}}V_A}{\lambda} \sin(\theta/2) \quad (1)$$

其中, n_{eff} 为光纤中传输模式的有效折射率, V_A 为光纤中的声速, λ 为入射光波长, θ 为散射角。

◆布里渊散射线宽。光纤的布里渊线宽是布里渊散射谱的 3 dB 带宽也称为半值全宽,其计算公式为:

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

其中, η 为光纤的粘滞系数, ρ 为光纤材料密度。

◆布里渊散射增益峰值。当入射泵浦光与反射的 Stokes 光的频率差 $\nu = \nu_B$ 时,布里渊散射谱的增益峰值为:

$$g_0 = g_B(\nu_B) = \frac{2\pi^2 n_{\text{eff}}^2 p_{12}}{c\lambda^2 \rho V_A \Delta v_B} \quad (3)$$

其中, c 为真空中光速, p_{12} 为光纤的纵向弹光系数。

◆布里渊散射谱。布里渊散射谱计算公式如式(6)所示。

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2} \quad (4)$$

其中, ν 是泵浦光与 Stokes 光的频率差。

1.2.2 模式叠加

多模光纤中存在多种传输模式,模式叠加后存在展宽等效应,布里渊叠加谱频移、布里渊叠加谱线宽

的计算公式分别如式(5)、式(6)所示。

$$v_{B1} = V_A \left(\frac{n_{\text{eff1}}}{\lambda_1} + \frac{n_{\text{eff2}}}{\lambda_2} \right) \approx \frac{V_A}{\lambda} (n_{\text{eff1}} + n_{\text{eff2}}) \quad (5)$$

$$\Delta v_{B1} = \left(\Delta v_{B0}^2 + v_{B\text{max}}^2 \frac{(NA)^4}{4n_{\text{co}}^4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中, Δv_{B0} 为纯石英玻璃布里渊线宽, n_{co} 为纤芯折射率, NA 为光纤数值孔径, $v_{B\text{max}}$ 为布里渊频移的最大值。

由于多模光纤对应不同模式的光线入射到光纤的角度不同,从而有不同的布里渊散射角。受到数值孔径的限制,散射角 θ 在一定范围内改变。最大散射角 θ_{max} 在入射泵浦光的背向,此时 $\theta_{\text{max}} = \pi$;最小散射角 $\theta_{\text{min}} = \pi - 2\theta_c$,其中 θ_c 为全反射临界角的余角^[5]:

$$\theta_c = \arcsin \left(1 - \frac{n_{\text{cl}}^2}{n_{\text{co}}^2} \right)^{1/2} = \arcsin(NA/n_{\text{co}}) \quad (7)$$

其中, n_{cl} 为包层折射率。

当 θ 取最大值时,布里渊频移达到最大值:

$$v_{B\text{max}} = \frac{2n_{\text{co}}V_A}{\lambda} \quad (8)$$

当 θ 取最小值时,布里渊频移达到最小值:

$$v_{B\text{min}} = \frac{2n_{\text{co}}V_A \sqrt{1 - \frac{(NA)^2}{n_{\text{co}}^2}}}{\lambda} \quad (9)$$

目前,国内外针对多种模式叠加谱的计算公式较为复杂,本文借鉴了光纤波导不均匀导致的布里渊散射谱展宽公式来描述多模光纤^[8]:

$$g_{B1}(\nu) = G_0 \frac{\Delta v_{B0}/2}{v_{B\text{max}} - v_{B\text{min}}} \times \left[\arctan \left(\frac{v_{B\text{max}} - \nu}{\Delta v_{B0}/2} \right) - \arctan \left(\frac{v_{B\text{min}} - \nu}{\Delta v_{B0}/2} \right) \right] \quad (10)$$

其中, G_0 为纯石英玻璃增益系数。

2 仿真及分析

2.1 光纤模式分布

本文选用长飞公司 50/125 μm 阶跃型多模光纤进行数值仿真,光纤的具体参数如下:工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,纤芯折射率为 1.45,包层折射率为 1.436,数值孔径 $NA = 0.2$,归一化频率 $V \approx 20.258$ 。

本文运用 Comsol 软件进行建模分析,选择射频-电磁波频域模块,建立了多模光纤的二维波导模型,根据待求解问题特征自适应剖分的类型,剖分精度为最高,网格类型为三角形。

经过仿真可知,该光纤在工作波长下,可以传输

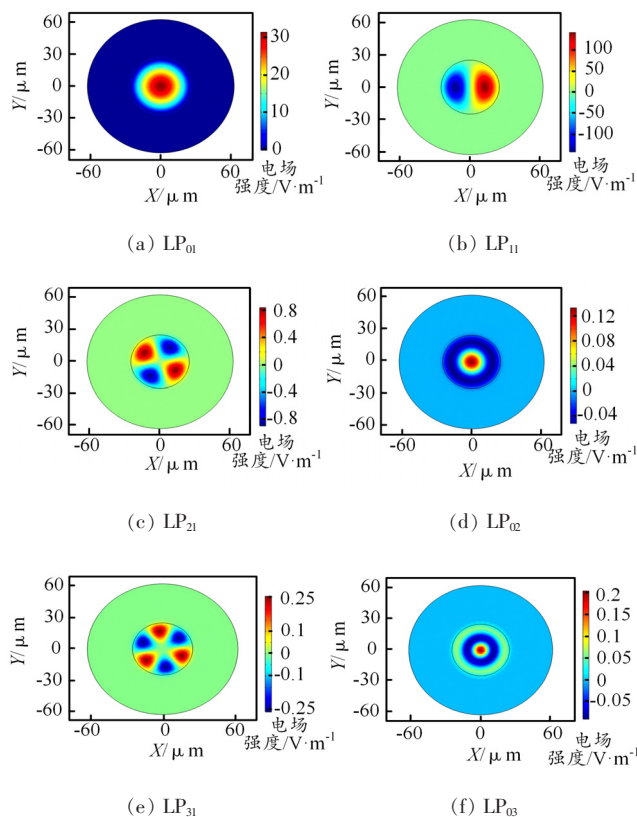


图1 多模光纤的6种传输模式的电场强度分布

很多种模式。为了便于分析研究,本文选择了6种典型的传输模式:LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₀₂、LP₃₁和LP₀₃,有效折射率分别为1.4498、1.4496、1.4492、1.4491、1.4488和1.4477,即随着模式阶数的增加有效折射率逐渐减小。多模光纤的6种传输模式的电场强度分布情况如图1所示。

2.2 布里渊散射谱

为了便于分析多模光纤不同传输模式的布里渊散射谱,本节将对多模光纤LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₀₂、LP₃₁和LP₀₃共6种模式进行分析计算,主要从布里渊频移、线宽、增益峰值、单一模式布里渊谱和模式叠加后的布里渊谱5个方面展开论述。

一般情况下,光纤中的声速 $V_A=5544$ m/s,入射光波长 $\lambda=1550$ nm,光纤材料密度 $\rho=2210$ kg/m³,真空中光速 $c=3.0\times 10^8$ m/s,光纤的纵向弹光系数 $p_{12}=0.27$,入射光频率为9.8~10.8 GHz,纯石英玻璃布里渊线宽 $\Delta\nu_{B0}$ 和峰值增益 G_0 分别为20 MHz和 5×10^{-11} m $\cdot$ W⁻¹。

2.2.1 布里渊频移

由式(1)可以得出,不同传输模式的布里渊频移都与其有效折射率和散射角有关。为了便于分析比较,取散射角 $\theta=\pi$,再利用式(1)计算出的布里渊频移如图2所示。布里渊频移在10.35~10.37 GHz范围内

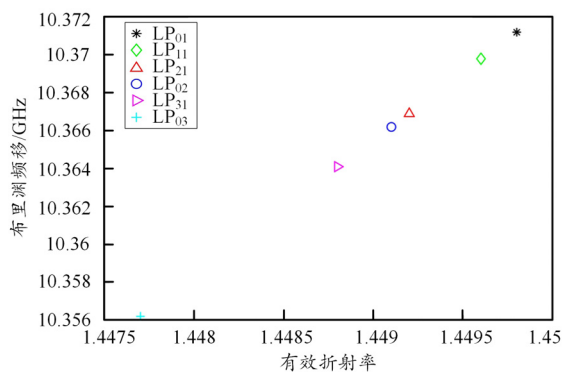


图2 多模光纤不同传输模式的布里渊频移

变化,且随模式增加而减少。由式(1)结合不同模式下的有效折射率可知,模式阶数的增加并未给布里渊频移带来成倍的变化,但由于其本身的数量级(GHz)就很高,且通常在分布式传感中外界参数的改变对布里渊频移的影响多在100 MHz范围内。因此,考虑上述2种因素可得模式阶数对布里渊频移的影响较大。由图2可知,不同模式的布里渊频移均在10.3 GHz左右,而且随着模式阶数的增加布里渊频移存在下降的趋势。

2.2.2 线宽

从式(2)可以得出,不同传输模式的布里渊线宽与其有效折射率和光纤结构参数有关。将不同模式下的相关参数代入式(2)得到不同模式下的布里渊线宽与折射率的关系如图3所示。可以看出,多模光纤不同模式的线宽在21.81~21.88 MHz范围内变化,不同模式布里渊线宽随着模式阶数的增加而略有下降,这是因为随模式阶数的增加,有效折射率略有下降。本文测得不同模式的布里渊线宽大致为22 MHz。

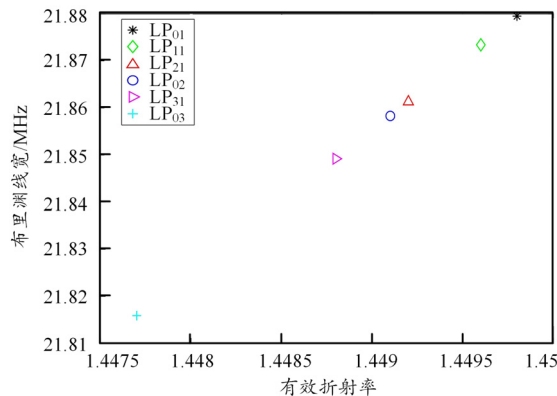


图3 多模光纤不同传输模式的布里渊线宽

2.2.3 增益峰值

由式(3)可以得出,不同传输模式的布里渊增益峰值与其有效折射率、线宽和光纤结构参数有关。根

赵丽娟,车小霞,徐志钮,等:多模光纤不同传输模式的布里渊散射特性

据式(3)可得不同模式的增益峰值如图4所示。可以看出,不同模式的布里渊谱对应的增益峰值在 $9.95 \times 10^{-11} \sim 1.00 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ 范围内变化,随着模式阶数的增加略有减小。这是因为随模式阶数的增加,有效折射率略有下降。

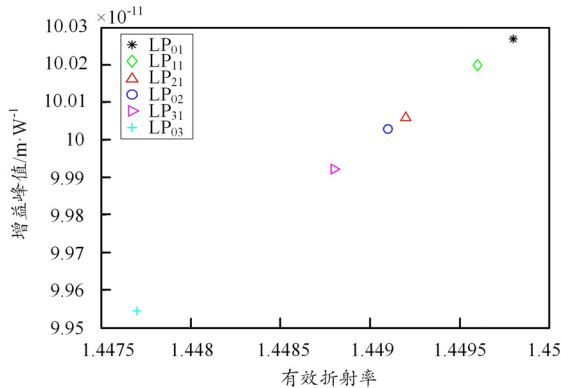


图4 多模光纤不同传输模式的布里渊增益峰值

2.2.4 不同模式的布里渊谱

为了更加直观地看出多模光纤的不同传输模式布里渊散射特性,本文给出了多模光纤6种传输模式的布里渊散射谱。由于单一模式下的多模光纤布里渊特性与单模光纤一致,因此采用式(4)算得不同传输模式的布里渊谱如图5所示。可以看出,多模光纤不同传输模式的布里渊频移有较为明显的差别。由此,可以尝试根据不同传输模式布里渊频移的差异来分别监测不同的物理量,从而获得不同的信息,以期为研制基于多模光纤不同传输模式布里渊散射特性的分布式光纤传感提供新思路。

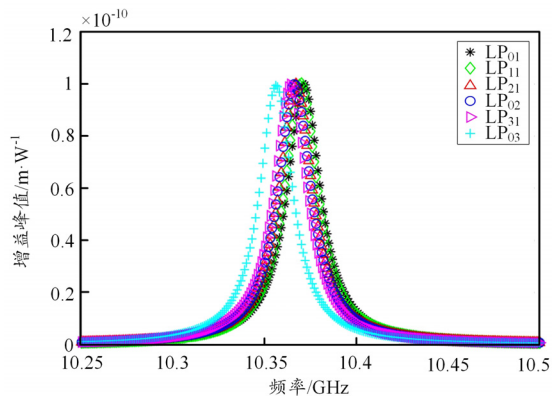


图5 多模光纤不同传输模式的布里渊谱

2.2.5 模式叠加后的布里渊谱

在多物理量测量过程中,难免会出现相邻模式之间布里渊频移和谱宽相差较小的情况。在常规情况下,实验测得的布里渊谱多为多个模式叠加的结果。

因此非常有必要分析几种传输模式的联运谱的特性。本文分析了2种传输模式的联运谱,即把多模光纤传输模式两两组合成如 $\text{LP}_{01}\text{-LP}_{11}$ 、 $\text{LP}_{11}\text{-LP}_{21}$ 、 $\text{LP}_{21}\text{-LP}_{02}$ 、 $\text{LP}_{02}\text{-LP}_{31}$ 和 $\text{LP}_{31}\text{-LP}_{03}$ 的模式对,然后将传输模式对的2种模式参量代入式(5)和式(6)可分别得到2种模式叠加后的布里渊频移、线宽。双模式的联运布里渊散射参数如表1所示。代入2种模式参量,利用式(10)求得的多模光纤2种传输模式联运谱如图6所示。此时,式(10)中 v_{Bmax} 和 v_{Bmin} 分别为2种传输模式的布里渊频移的较大和较小值。

表1 双模式联运谱布里渊散射参数

模式对	布里渊频移/GHz	线宽/MHz	增益峰值/ $\text{m} \cdot \text{W}^{-1}$
$\text{LP}_{01}\text{-LP}_{11}$	10.3705	100.66	4.9795×10^{-11}
$\text{LP}_{11}\text{-LP}_{21}$	10.3684	100.65	4.9595×10^{-11}
$\text{LP}_{21}\text{-LP}_{02}$	10.3666	100.62	4.9879×10^{-11}
$\text{LP}_{02}\text{-LP}_{31}$	10.3651	100.62	4.9806×10^{-11}
$\text{LP}_{31}\text{-LP}_{03}$	10.3601	100.60	4.7610×10^{-11}

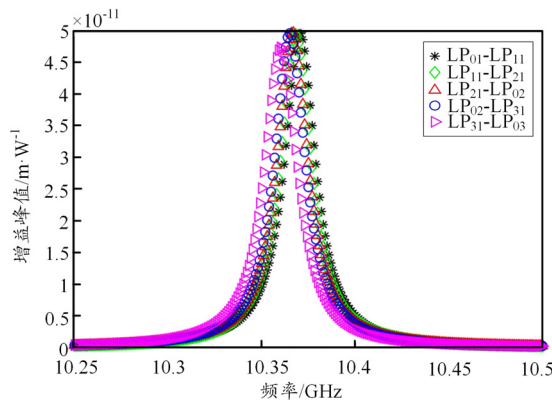


图6 多模光纤2种模式联运谱

由表1可知,5种双模式叠加布里渊散射谱增益峰值存在差异,且2种模式阶数跨度越大差异越明显。造成上述现象的原因是不同模式的布里渊散射谱之间发生干涉和耦合,且相位匹配条件的声速与有效折射率也存在差别。

从图6可以看出以上5种联运谱均是单峰,但当2种模式布里渊频移相差较大时联运谱会出现双峰^[9]。由于以上5种联运谱模式间的布里渊频移相差较小,故没有出现双峰。

在研究了2种传输模式叠加的情况下布里渊散射谱的规律之后,考虑到通常的分布式光纤传感过程中检测到的布里渊散射谱为全模式叠加谱,故本文采用式(7)~式(9)算得 v_{Bmax} 和 v_{Bmin} ,将其代入式(10)求出

了多模光纤所有模式叠加后的布里渊散射谱,如图7所示。

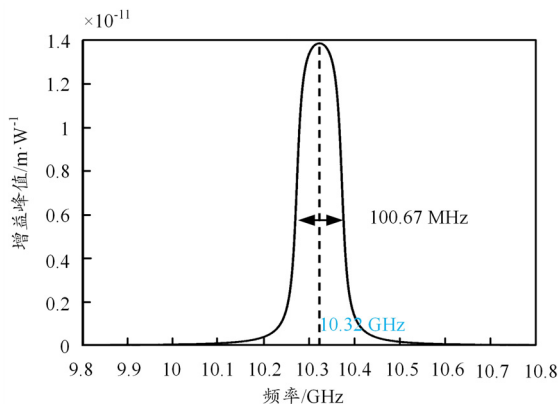


图7 多模光纤的布里渊散射谱

由图7可以看出,多模光纤的布里渊频移为10.32 GHz,均小于单一模式对应的布里渊频移。布里渊谱由于多种模式叠加和数值孔径的影响线宽发生展宽为100.67 MHz,是单一模式的4.6倍。

由于偏振模色散使得模式叠加后得到的增益峰值大幅减小为 $1.4 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$,大致为单一模式下增益峰值 $1 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ 的0.1倍。

3 结束语

本文对多模光纤不同传输模式的布里渊散射进行了理论分析以及计算,分析了阶跃型多模光纤中不同传输模式下的布里渊频移、线宽和增益峰值并进行了模式叠加。仿真结果表明:多模光纤中不同传输模式的布里渊散射特性与各传输模式的有效折射率(随着模式阶数增加而减小)紧密相关,典型的6种传输模式的布里渊频移在10.35~10.37 GHz范围内变化、线宽在21.81~21.88 MHz范围内变化、增益峰值都随着模式阶数的增加逐渐减小,且模式叠加后的布里渊谱较单一模式的布里渊谱频谱有所展宽,增益峰值减

小;在多模式叠加且不受应变和温度影响的情况下,布里渊频移在10.3 GHz左右,线宽发生100.67 MHz的展宽,布里渊增益峰值为 $1.4 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ 。本文为多模光纤布里渊散射谱研究提供了一种可行的方法,而且对基于多模光纤布里渊散射的分布式传感系统的深入研究提供了必要的理论参考。

参考文献:

- [1] FOTTADI A A, KUZIN E A. Stimulated Brillouin scattering amplification in multimode optical fibers [C]// CLEO '97, Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics, May 18–23, 1997, Baltimore, USA. New York: IEEE, 2002: 380–381.
- [2] IEZZI V L, LORANGER S, HARHIRA A, et al. Stimulated Brillouin scattering in multi-mode fiber for sensing applications [C]// 2011 7th International Workshop on Fibre and Optical Passive Components, July 13–15, 2011, Montreal, Canada. New York: IEEE, 2011: 1–4.
- [3] KE W W, WANG X J, TANG X. Stimulated Brillouin scattering model in multi-mode fiber lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 305–314.
- [4] DONG Y, XU P, ZHANG H, et al. Characterization of evolution of mode coupling in a graded-index polymer optical fiber by using Brillouin optical time-domain analysis [J]. Optics Express, 2014, 22 (22): 26510–26516.
- [5] 赵丽娟,李永倩,徐志钮.多模光纤布里渊散射谱及阈值理论计算[J].红外与激光工程,2015,44(S1):93–98.
- [6] 顾晓仪,黄永清,陈雪,等.光纤通信[M].第2版.北京:人民邮电出版社,2011.
- [7] 王如刚.光纤中布里渊散射的机理及其应用研究[D].南京:南京大学,2012.
- [8] KOVALEV V I, HARRISON R. Waveguide-induced inhomogeneous spectral broadening of stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2000, 27(22): 1879–1882.
- [9] MINARDO A, BERNINI R, ZENI L. Analysis of the Brillouin gain spectrum in a graded-index multimode fiber[C]// 2014 Third Mediterranean Photonics Conference, May 7–9, 2014, Trani, Italy. New York: IEEE, 2014: 1–3.

第二届《光通信技术》年度优秀论文评选活动公告

尊敬的各位作者和读者:

为了活跃光通信学术氛围,提高光通信科技水平,提升《光通信技术》杂志所刊登光通信技术文章的科技含量和实用性,《光通信技术》编辑部决定从2019年起,每年举办一次《光通信技术》优秀论文评选活动,评选出本年度6~10篇已正式刊登(纸质版)的优秀论文,对获优秀论文奖的第一署名作者颁发荣誉证书和现金奖励(500元/篇),获奖名单将在2020年第12期《光通信技术》杂志和网站公布。敬请广大作者积极支持我们的工作,踊跃佳作,与我们共同携手把《光通信技术》办得更好。

《光通信技术》编辑部