

少模光纤的不同模式布里渊散射特性

张燕君 高浩雷 付兴虎 田永胜

Characterization of Brillouin scattering in a few-mode fiber

Zhang Yan-Jun Gao Hao-Lei Fu Xing-Hu Tian Yong-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 024207 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.024207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

饱和非线性介质中艾里-高斯光束的传输与交互作用

Propagation and interactions of Airy-Gaussian beams in saturable nonlinear medium

物理学报.2016, 65(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.244202>

在单零色散微结构光纤中一次抽运同时发生两组四波混频的实验观察

Experimental studies of two sets of four-wave mixing processes in a single-zero-dispersion microstructured fiber by the same pump

物理学报.2016, 65(21): 214201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214201>

高效频率转换下双波长外腔共振和频技术研究

Double resonant sum-frequency generation in an external-cavity under high-efficiency frequency conversion

物理学报.2016, 65(7): 074202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074202>

新型偶氮苯衍生物的三阶非线性光学特性

Third-order nonlinear optical properties of an azobenzene derivate

物理学报.2016, 65(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024207>

周期量级飞秒脉冲电场在非线性克尔介质中的传输

Propagation of electric field of the few-cycle femtosecond pulse in nonlinear Kerr medium

物理学报.2016, 65(1): 014208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014208>

少模光纤的不同模式布里渊散射特性*

张燕君 高浩雷 付兴虎† 田永胜

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2016年7月13日收到; 2016年10月18日收到修改稿)

少模光纤可以传输有限的正交模式, 具有模间干涉小、模式易于控制等优点. 基于少模光纤的布里渊散射传感器能够有效地减小多参量测量过程中的交叉敏感, 实现多物理量的测量. 本文基于波动光学理论对阶跃型少模光纤各个模式布里渊散射谱的频移、线宽、峰值增益等参数进行了分析. 首先对少模光纤进行了模式分析, 其次分析了少模光纤不同模式的频移、线宽、增益的数学模型, 以及不同模式叠加的布里渊散射谱频移、线宽、增益. 结果表明: 少模光纤各模式布里渊散射谱的频移在 10.19—10.23 GHz 范围内, 且随模式阶数的减小而增加; 各模式布里渊散射谱的线宽在 32—34 MHz, 且随模式阶数的减小而增加; 各模式布里渊散射增益谱相对幅度因为模式阶数的减小而增大. 少模光纤中各个模式布里渊增益谱和多模式联运布里渊增益谱均符合洛伦兹曲线分布, 多模式联运导致布里渊增益谱线宽展宽, 且多模式联运布里渊增益谱相对振幅一般小于单个模式的布里渊相对振幅.

关键词: 少模光纤, 布里渊散射, 波动光学, 布里渊增益谱

PACS: 42.65.-k, 78.35.+c, 43.35.Dh

DOI: 10.7498/aps.66.024207

1 引言

光纤传感技术有抗腐蚀、电绝缘性、抗电磁干扰等特点, 在实际应用方面有不可比拟的优势^[1-3]. 分布式光纤传感技术能将传输与传感结合, 获得待测信息随时间、空间的变化关系^[4,5], 实现被测信息的大范围实时监测^[6], 基于布里渊散射的光纤传感技术更引起了国内外学者的关注^[7]. 然而基于布里渊散射的光纤传感面临着很多技术难题, 特别是多参量监测过程中的交叉敏感问题^[8]. 少模光纤(few-mode fiber, FMF)具有相对独立的信道可以传输更多的正交模式, 且模间干涉小, 模式易于控制^[9,10]. 光信号在少模光纤中传输时, 各模式引起的布里渊散射是不相同的, 且各物理量所引起的布里渊响应也会有差异. 利用少模光纤布里渊散射效应, 可望减小多参量交叉敏感问题, 实现

对不同物理量的实时监测, 因此对 FMF 各模式布里渊散射的研究尤为重要.

2013年, Song等^[11]在一个双模椭圆芯光纤中证实了受激布里渊散射效应的存在, 不同模式间存在强烈的受激布里渊散射效应. 同年 Song 和 Kim^[12]又在阶跃型少模光纤的实验中测量了各模式布里渊散射谱(Brillouin gain spectrum, BGS)的特性, 其中各个模式的布里渊散射频移在 10.2—10.3 GHz 之间, 线宽在 30—40 MHz 之间, 并与双模光纤的散射特性做了对比. 但没有进行阶跃型少模光纤布里渊散射效应、布里渊散射谱的数学性描述, 对阶跃型少模光纤布里渊散射的分布式传感系统的优化设计有一定的影响.

因此本文提出了分析 FMF 的布里渊散射效应, 在波动光学理论的基础上研究阶跃型 FMF 不同模式的布里渊散射谱、频移、线宽、增益, 并对不同模式的散射谱以及联运谱进行对比分析.

* 国家自然科学基金(批准号: 61675176)、河北省自然科学基金(批准号: F2014203125)和燕山大学“新锐工程”人才支持计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

2 理论分析

2.1 少模光纤的模式分析

少模光纤中存在少量而稳定的传输模式, FMF 的包层与纤芯的折射率非常接近 (即 $n_1 \approx n_2$), 相对折射率之差 $(n_1 - n_2)/n_2 \ll 1$ 符合弱导近似的条件. 当只考虑模式的传输系数时, 可以认为光波导在弱导光纤中传播的横向场是沿着同一个方向极化且保持不变的, 就可以运用在弱导近似下的线偏振模 (linearly polarized mode, LP 模) 对 FMF 分析. 光纤中导波模的传播常数 β 满足: $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$, 截止条件为 $\beta = n_2 k_0$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, 与截止条件相对应的归一化频率 V 决定了光纤可以支持的模式总数为

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (1)$$

式中, λ 是入射光波长; a 是纤芯的半径; 其中 NA 是光纤的数值孔径 $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin \alpha$, α 是光纤与空气界面的全反射入射角. 归一化频率是表征光纤中模式传输特性的重要参数, V 越大允许存在的导模越多, 反之亦然. 当 $V \leq 2.2048$ 时, 只允许一个模式 (HE_{11}), 式中光纤模式的数量 $M = V^2/2$.

2.2 少模光纤的布里渊散射布里渊增益谱的参数

布里渊散射是入射光波的光学光子与介质里的玻色子 (声子或磁振子) 相互作用, 产生的一种非弹性光散射现象^[13]. 光波以不同角度耦合进 FMF, 其频率不同, 各个模式光波有各自的有效折射率, 在 FMF 中光波散射频率不同, 散射频率的值还与光纤中的声波场和散射角特性相关, 在 FMF 中各个模式的散射光会发生相互作用. 为了分析不同模式的 BGS 参数, 分别耦合进 FMF 各个模式的光, 各个模式独立传播, 和介质中的声子、磁振子各自耦合引起布里渊散射效应.

少模光纤的各个模式所产生的布里渊散射谱均符合洛伦兹谱线分布, 并且布里渊散射谱可由布里渊散射频移、线宽、峰值等参量描述.

1) BGS 频移

光波以不同角度入射到少模光纤中, 在光纤中沿各自的路径传播, 因为其有效折射率不同, 各个模式由不同的散射角各自引起布里渊散射频移如下式^[14,15]:

$$\Delta F_B = \frac{2n_{\text{eff}}v}{\lambda} \cos(\theta/2), \quad (2)$$

式中, n_{eff} 为 FMF 中各个模式的有效折射率, v 为 FMF 中声波的相速度, 即

$$v = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}}, \quad (3)$$

式中 k 是光纤的泊松比; E 是介质杨氏模量; ρ 是介质的密度; θ 是不同模式的散射角, 如图 1 所示.

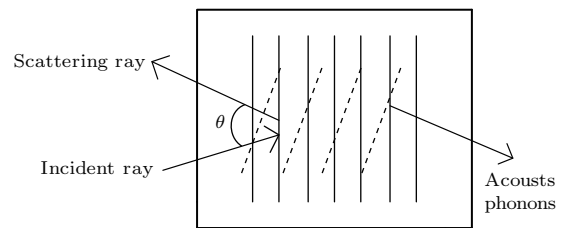


图 1 布里渊散射角

Fig. 1. Brillouin scattering angle.

2) BGS 线宽

每种模式在光纤中传输产生各自的 BGS. 少模光纤布里渊散射线宽是其布里渊散射谱主峰的半高全宽^[16,17], 即

$$\Gamma = \frac{16\pi^2 n_{\text{eff}}^2 \eta}{\lambda^2 \rho}, \quad (4)$$

式中, η 为介质材料的粘滞系数.

3) BGS 的峰值相对振幅

少模光纤 BGS 跟入射光有关, 其各个模式所产生的 BGS 峰的相对振幅与布里渊散射谱的振幅、谱宽相关^[18-20], 即

$$g_B(v_A) = g_0 \frac{(\Gamma/2)^2}{(v_A - v_B)^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (5)$$

式中 g_0 是布里渊增益系数, v_A 是入射光频率, v_B 为 BGS 中心频率. 当入射光的频率 $v_A = v_B$ 时, 布里渊散射谱的最大增益峰值为

$$g_0 = g_B(v_B) = \frac{2\pi^2 n_{\text{eff}}^7 p_{12}^2}{c\lambda^2 \rho v \Gamma}, \quad (6)$$

式中, c 为真空中光速, p_{12} 是介质的弹光系数.

把 (4) 式代入布里渊峰值增益表达式 (6) 式, 可以看出布里渊散射谱峰值 g_B 与波长 λ 无关.

3 结果与分析

本文选用了长飞公司生产的SI-10型实芯20/125 μm 阶跃型少模光纤, 纤芯的折射率 $n_1 = 1.4683$, 包层的折射率 $n_2 = 1.4625$, 相差0.0058, 符合弱导近似的条件. 光纤的数值孔径 $NA = 0.13$, 少模光纤的归一化频率 $V = 5.267$, 工作波长1550 nm, 纵向弹光系数 $p_{12} = 0.27$, 其中光纤粘滞系数大约是300—400 mPa·s.

3.1 模式分析

当抽运光入射到FMF中, 不同模式在FMF中传输的有效折射率不同且拥有各自的传输路径. 本文采用了有限元分析法对少模光纤的模式以及有

效折射率进行分析, 该少模光纤中的磁场强度满足亥姆霍兹方程:

$$\nabla \times (n^{-2} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \mathbf{H} = 0, \quad (7)$$

式中磁场强度 $\mathbf{H} = H(x, y) \exp(-j\beta z)$, n 为光纤截面的折射率分布. 根据光纤给定的求解区域、纤芯与包层的半径以及折射率、入射光波长和边界条件将少模光纤的横截面划分为有限个网格单元, 在单元格内选择合适的节点作为插值点求解函数, 使其离散化, 进一步求出所有特征值和特征向量, 计算出给定波长下各模式的磁场强度 H 与传播常数 β , 从而计算出各模式的有效折射率 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$. 选用1550 nm的入射光对少模光纤进行分析, 可以得到该光纤传输 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} , LP_{31} 模式, 其有效折射率分别是1.4664, 1.4652, 1.4637, 1.4630, 1.4616, 如图2所示.

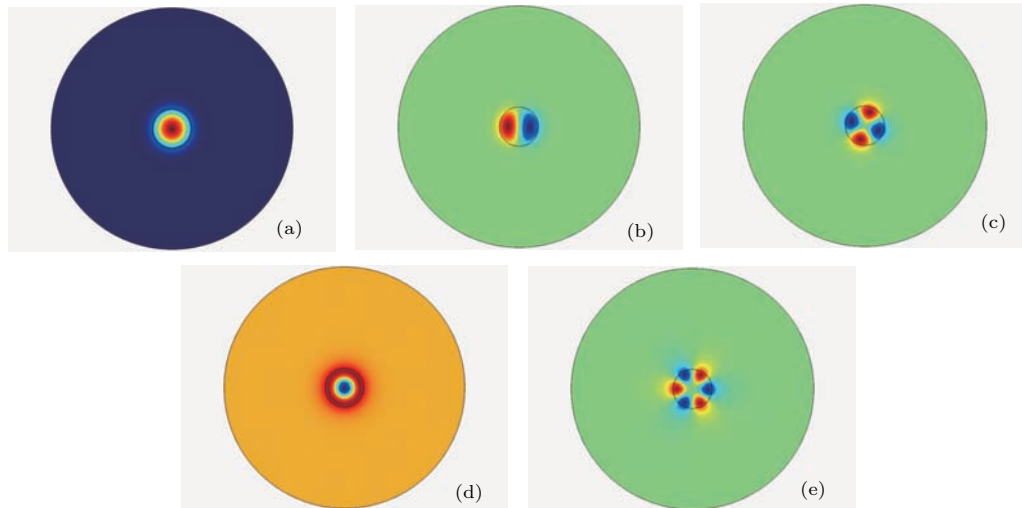


图2 (网刊彩色) FMF中各个模式 (a) LP_{01} ; (b) LP_{11} ; (c) LP_{21} ; (d) LP_{02} ; (e) LP_{31}

Fig. 2. (color online) Each mode in FMF: (a) LP_{01} ; (b) LP_{11} ; (c) LP_{21} ; (d) LP_{02} ; (e) LP_{31} .

3.2 BGS频移

由(2)式可以看出, FMF的布里渊频移与传输模式、散射角都相关. 为了更好地观察布里渊频移与模式的关系, 取散射角为 0° 时分析得到布里渊散射频移与模式变化规律如图3所示.

由图3可以看出FMF中各个模式的布里渊频移随着模式阶数的递增而递减, 主要原因是入射到FMF中光波的角度不同使得FMF中各个模式的有效折射率发生变化, 且随模式阶数的递增而递减, 引起其布里渊频移减小. 文献[12]测得的光纤的主频移在10.213—10.299 GHz之间且主峰频移随模式阶数的增加而减小, 与本文分析相符合.

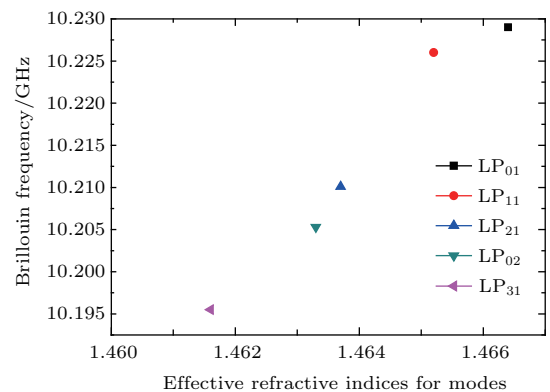


图3 少模光纤中五种模式的BGS频移

Fig. 3. BGS frequency shift of five modes in FMF.

3.3 BGS线宽

由(4)式可知BGS线宽随着模式的变化如图4所示. 由图4可以看出, BGS的谱线宽度随着模式阶数的增加逐渐减小, 主要原因是高阶模式在FMF中的传播常数较小使得其有效折射率较低. 文献[12]测得的光纤的线宽在30—40 MHz之间且随模式阶数的增加而减小, 与本文分析相符合.

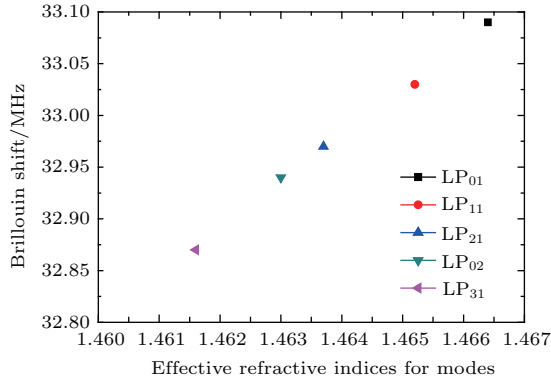


图4 少模光纤中五种模式的BGS线宽

Fig. 4. BGS line width of five modes in FMF.

3.4 BGS峰相对振幅

少模光纤的BGS峰的相对振幅由(6)式得出, 如图5所示.

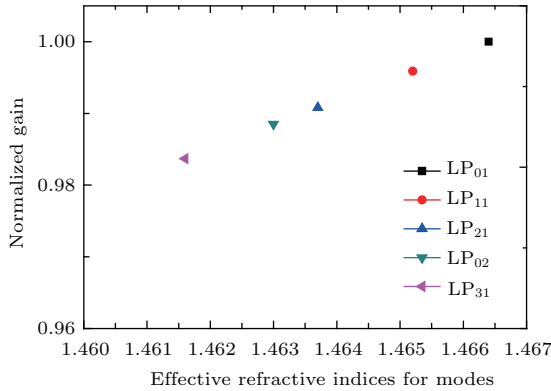


图5 少模光纤内五种模式峰值的归一化增益

Fig. 5. Normalized gain of the peak of the five modes in FMF.

由图5可以看出, 每种模式的BGS的峰值增益随着模式阶数的增加而减少, 且相对幅度均在1—0.98范围, 而布里渊散射谱的增益的减少也是因为各个模式有效折射率的减小造成的, 文献[12]测得的主峰相对峰值随模式阶数的增加而减小, 与本文分析相符合.

综上所述可以得出, 少模光纤的各模式的BGS如图6所示.

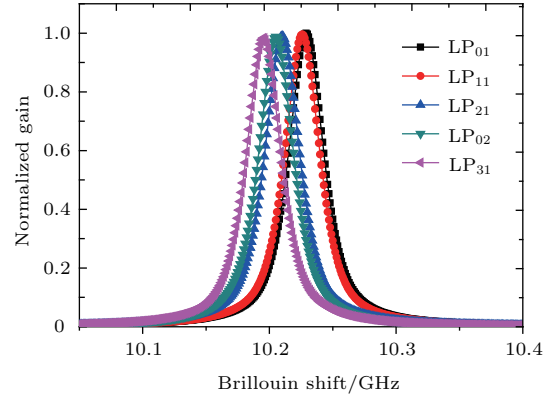


图6 (网刊彩色) 少模光纤五种模式的BGS

Fig. 6. (color online) BGS of each mode in FMF.

图6中, 布里渊散射谱的频移、谱宽、峰值增益因模式不同而发生变化, 不同物理量引起的不同模式的布里渊散射频移、谱宽与峰值响应也会不同, 然后进一步分析每种模式的布里渊散射谱所对应不同物理量特性, 就能够应用少模光纤同时监测不同的信息参量.

在多物理量测量过程中也会出现相邻谱之间模式频移、谱宽相差较小, 所以多物理量测量过程中也会应用到某几种模式的联运谱测量, 本文分析了两种模式的联运谱, 分别耦合进少模光纤两种不同的模式, 光纤中光学光子与玻色子相互作用激发不同的布里渊散射谱, 不同的布里渊散射谱之间发生干涉与耦合, 布里渊增益叠加谱峰值[21]

$$g'_B(v_A) = g_0 \frac{\Gamma_0/2}{F_0 - F_C} \times \left[\tan^{-1} \left(\frac{F_0 - v_A}{\Gamma_0/2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{F_C - v_A}{\Gamma_0/2} \right) \right], \quad (8)$$

布里渊增益叠加谱线宽

$$\Gamma' \cong \left[\Gamma_0^2 + F_0^2 \frac{(NA)^4}{4n_1^4} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

布里渊增益叠加谱频移[22]

$$\Delta F'_B = v \left(\frac{n_{\text{eff}1}}{\lambda_1} + \frac{n_{\text{eff}2}}{\lambda_2} \right) \approx \frac{v}{\lambda} (n_{\text{eff}1} + n_{\text{eff}2}), \quad (10)$$

式中 g_0 , Γ_0 是纯石英布里渊增益系数、线宽; F_0 , F_C 分别是耦合进FMF不同模式布里渊散射频移的最大值与最小值; $n_{\text{eff}1}$, $n_{\text{eff}2}$ 是不同模式的有效折射率.

将少模光纤模式两两组合成如 LP_{01} - LP_{11} , LP_{01} - LP_{21} , LP_{01} - LP_{02} , LP_{01} - LP_{31} , LP_{11} - LP_{21} , LP_{11} - LP_{02} , LP_{11} - LP_{31} , LP_{21} - LP_{02} , LP_{21} - LP_{31} , LP_{02} - LP_{31} 的模式对, 模式对的两种模式参量代入(8)式—(10)式, 分别可得到叠加模式的布里渊散射谱的峰值增益、线宽和频移, 双模式联运布里渊散射谱如图7所示.

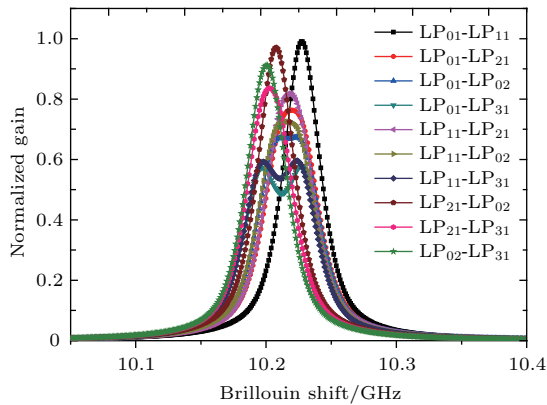


图7 (网刊彩色) 少模光纤不同模联运的BGS

Fig. 7. (color online) Intermodal BGS of different modes in the FMF.

由图7可以看到除了 LP_{01} - LP_{02} , LP_{01} - LP_{31} , LP_{11} - LP_{31} 出现双优峰外, 其他模式联运谱均是单峰, 这是因为 LP_{01} 与 LP_{02} , LP_{01} 与 LP_{31} , LP_{11} 与 LP_{31} 的布里渊频移相差较大, 其中每组模式对的BGS也是符合不同洛伦兹曲线分布的, 其中双模式联运布里渊散射谱的相对增益如表1所示.

表1 布里渊散射不同模式组的BGS相对增益系数
Table 1. Relative gain of the intermodal BGS of different modes in FMF.

Mode pair	Peak 1	Peak 2
LP_{01} - LP_{11}	0.989	
LP_{01} - LP_{21}	0.763	
LP_{01} - LP_{02}	0.672	0.673
LP_{01} - LP_{31}	0.573	0.578
LP_{11} - LP_{21}	0.818	
LP_{11} - LP_{02}	0.725	
LP_{11} - LP_{31}	0.592	0.596
LP_{21} - LP_{02}	0.971	
LP_{21} - LP_{31}	0.836	
LP_{02} - LP_{31}	0.912	

由表1可知少模光纤各模式对的布里渊峰值相对幅度, 比较单模与模式对之间的布里渊增益幅

度, 模式对的布里渊散射振幅小于单个模式的布里渊散射振幅是因为被测光纤的偏振模色散. 不同模式对联运的布里渊散射谱存在较大差异主要是因为布里渊散射相位匹配条件的声速与有效折射率的差别. 与文献[12]所测量的模式联运的BGS相较于单种模式的BGS增益下降、线宽展宽的现象相符合.

在非模分复用的传感过程中, 在光纤检测端检测到的布里渊散射是在FMF中传输的所有模式布里渊散射的联运谱, 如图8所示.

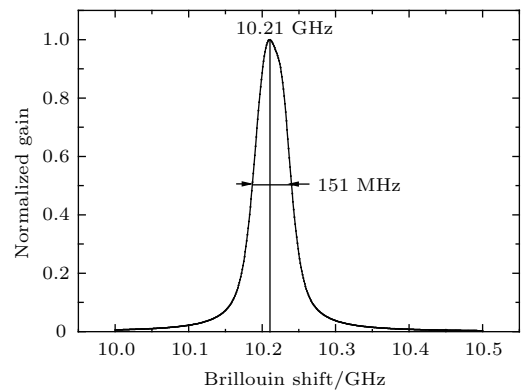


图8 少模光纤所有模式群的BGS

Fig. 8. Intermodal BGS of all modes in the FMF.

由图8可以看出BGS的频移是10.21 GHz, 谱宽是151 MHz, 可以看出此阶跃型少模光纤中所有模式联运使联运谱线宽相对于单个模式的布里渊散射谱线宽展宽, 主要是因为不同模式的布里渊散射谱的频移不同, 并且线宽相差很小.

3.5 其他阶跃型少模光纤的BGS分析

本文分析了SI-10阶跃型少模光纤的布里渊散射谱, 为了验证本文数学模型对阶跃型少模光纤的普遍适用性, 同时分析了另外两种阶跃型少模光纤.

1) 无锡启纳光电技术有限公司提供的20/125 μm 阶跃型四模光纤, 纤芯的折射率为1.4425, 包层的折射率为1.4375, 数值孔径为0.12, 其各模式的布里渊散射谱如图9所示.

2) 苏州库克光电技术有限公司提供的SIMM SI 20/125 μm 阶跃型双模光纤, 纤芯折射率为1.555, 包层折射率为1.550, 数值孔径为0.13, 其各模式的布里渊散射谱如图10所示.

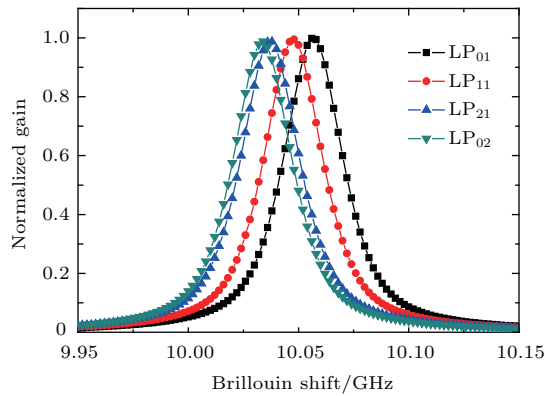


图9 四模光纤各模式的BGS

Fig. 9. BGS of each mode in four-model fiber.

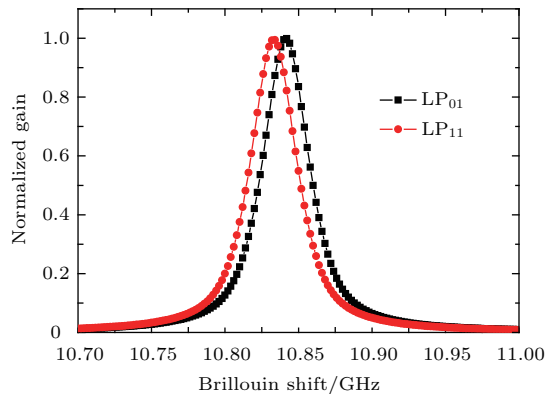


图10 双模光纤各模式的BGS

Fig. 10. BGS of of each mode in two-model fiber.

由图9和图10可以看出这两种阶跃型少模光纤的布里渊散射频移分别是10.03—10.06 GHz, 10.83—10.85 GHz, 线宽分别是31.8—32 MHz, 37.1—37.2 MHz, 且其线宽、频移与峰值增益都随着模式阶数的增加而减小, 由此可见本文提出的数学模型普遍适用于阶跃型少模光纤。

4 结 论

本文对基于FMF的布里渊散射进行了理论分析以及计算, 分析了阶跃型少模光纤的BGS频移、BGS线宽、BGS峰值增益的计算模型。结果表明, FMF中不同模式BGS和各模式的传输路径、有效折射率紧密相关, 各模式的布里渊散射谱线宽(32—34 MHz)、频移(10.19—10.23 GHz)、增益值都随着模式阶数的增大(有效折射率的减小)呈下降趋势。模式联运谱较单模谱频谱展宽, 由于偏振模色散使增益大幅减小。通过本文建立的数学模型可以看出阶跃型少模光纤各模式的布里渊散射频

移、线宽、峰值增益与其有效折射率紧密相关, 都会随着模式阶数的增加而减小, 而对于不同型号的阶跃型少模光纤的布里渊散射频移、线宽的值会略有不同, 该数学模型对阶跃型少模光纤的布里渊散射具有普遍适用性。本文为少模光纤布里渊传感系统的分析、制备、应用以及系统的评估、优化提供了一定的参考。

参考文献

- [1] Liao Y B 2003 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **16** 1 (in Chinese) [廖延彪 2003 大气与环境光学学报 **16** 1]
- [2] Hou J F, Pei L, Li Z X, Liu C 2012 *Ele-Optic Technol. Appl.* **27** 49 (in Chinese) [侯俊芳, 裴丽, 李卓轩, 刘超 2012 光电技术应用 **27** 49]
- [3] Ren C, Zhang S L 2009 *Laser Technol.* **33** 473 (in Chinese) [任成, 张书练 2009 激光技术 **33** 473]
- [4] Hu X D, Liu W H, Hu X T 1999 *Aviation Precision Manufacturing Technology* **35** 28 (in Chinese) [胡晓东, 刘文晖, 胡小唐 1999 航空精密制造技术 **35** 28]
- [5] Cho S B, Lee J J, Kwon I B 2004 *Opt. Express* **12** 4339
- [6] Liu D M, Sun Q Z 2009 *Laser Optoelect. Prog.* **46** 29 (in Chinese) [刘德明, 孙琪真 2009 激光与光电子学进展 **46** 29]
- [7] Wait P C, Newson T P 1996 *Opt. Commun.* **122** 141
- [8] Dong Y M, Zhang X P, Lu Y G, Liu Y H, Wang S 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 197 (in Chinese) [董玉明, 张旭苹, 路元刚, 刘跃辉, 王顺 2007 光学学报 **27** 197]
- [9] Blake J N, Huang S Y, Kim B Y, Shaw H J 1987 *Opt. Lett.* **12** 732
- [10] Ren F, Li J, Hu T, Tang R Z, Yu J Y, Mo Q, He Y Q, Chen Z Y, Li Z B 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 7903509
- [11] Song K Y, Kim Y H, Kim B Y 2013 *Opt. Lett.* **38** 1805
- [12] Song K Y, Kim Y H 2013 *Opt. Lett.* **38** 4841
- [13] Cheng G X 2014 *Chin. J. Light Scatt.* **26** 97 (in Chinese) [程光照 2014 光散射学报 **26** 97]
- [14] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D 2010 *Adv. Opt. Photonics* **2** 1
- [15] Scarcelli G, Yun S H 2008 *Nat. Photonics* **2** 39
- [16] Li Q, Lv Z W, Ha S W L J, Dong Y K, He W M 2006 *High Pow. Las. Part. Beam.* **18** 1481 (in Chinese) [李强, 吕志伟, 哈斯乌力吉, 董永康, 何伟明 2006 强激光与粒子束 **18** 1481]
- [17] Boyd R W 1992 *Nonlinear Optics* (New York: Academic press) pp347–349
- [18] Song K Y, Abedin K S, Hotate K, González H M, Thévénaz L 2006 *Opt. Express* **14** 5860
- [19] Geng P J, Xu J D, Wei G, Guo C J, Li Y 2002 *J. Test and Measurement Technology* **16** 87 (in Chinese) [耿军平, 许家栋, 韦高, 郭陈江, 李焱 2002 测试技术学报 **16** 87]
- [20] Garcus D, Gogolla T, Krebber K, Schliep F 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 654
- [21] Kovalev V I, Harrison R G 2002 *Opt. Lett.* **27** 2022
- [22] Sorin W V, Kim B Y, Shaw H J 1986 *Opt. Lett.* **11** 106

Characterization of Brillouin scattering in a few-mode fiber^{*}

Zhang Yan-Jun Gao Hao-Lei Fu Xing-Hu[†] Tian Yong-Sheng

(Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 13 July 2016; revised manuscript received 18 October 2016)

Abstract

The few-mode fiber can be used to transmit limited orthogonal modes, which has the advantages of small modular interference and easily controlled modes. The Brillouin scattering sensor based on the few-mode fiber can effectively reduce the cross sensitivity of multi parameter measurement, and realize the measurement of multi physical quantity. In this paper, based on the wave optics theory, the Brillouin scattering spectrum parameters of the step-index few-mode fiber are analyzed, such as frequency shift, line width and peak gain and so on. Firstly, the transmission modes of the few-mode fiber are analyzed. The finite element analysis result shows that there are 5 kinds of transmission modes: LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} and LP_{31} , and their effective refractive indexes are 1.4664, 1.4652, 1.4637, 1.4630 and 1.4616, respectively. Secondly, the mathematical models of the Brillouin frequency shift, line width and peak gain of different modes in the few-mode fiber are analyzed. Finally, the parameters of Brillouin scattering spectrum with different modes' superposition are also discussed. In the few-mode fiber, due to the different effective refractive index, the light of each mode is propagated along its respective path and interacts with the particles in the fiber, thus producing different Brillouin scattering spectrum. The simulation results show that the frequency shift of the Brillouin scattering spectrum of each mode is in a range of 10.19–10.23 GHz, and the frequency shift increases with the decrease of the mode order. The Brillouin line width of each mode is in a range of 32–34 MHz, and the line width also increases with the decrease of the mode order. Moreover, the relative amplitude of the Brillouin scattering gain spectrum increases with the decrease of the mode order. The mathematical models of this paper are used respectively to analyze the Brillouin scattering spectra of other types of step-index few-mode fibers. It is shown that the Brillouin frequency shift, Brillouin line width and peak gain of other types of step-index few-mode fibers also increase with the decrease of the mode order. In a step-index few-mode fiber, intramodal Brillouin scattering spectrum and the intermodal Brillouin scattering spectrum are both in line with the distribution of Lorenz curve. However, the intermodal Brillouin scattering spectrum of modes' superposition leads to the line width broadening of the Brillouin scattering spectrum, and the relative amplitude of the intermodal Brillouin scattering spectrum of modes' superposition being generally smaller than that of intramodal.

Keywords: few-mode fiber, Brillouin scattering, wave optics, Brillouin gain spectrum

PACS: 42.65.-k, 78.35.+c, 43.35.Dh

DOI: 10.7498/aps.66.024207

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61675176), the Natural Science Foundation of Hebei, China (Grant No. F2014203125), and the "Xin Rui Gong Cheng" Talent Project of Yanshan University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn