

M 型少模光纤中模间受激布里渊散射特性及其温度和应变传感特性*

李雪健 曹敏 汤敏 半月安 陶洪 古皓
任文华 简伟 任国斌†

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

(2020 年 1 月 15 日收到; 2020 年 3 月 12 日收到修改稿)

少模光纤的受激布里渊散射对于分布式温度/应变传感具有重要应用价值. 本文提出一种纤芯折射率呈 M 型分布的少模光纤, 详细研究了光学模式 LP_{01} 和 LP_{11} 模式内及模式间的布里渊增益谱. 研究表明: LP_{01} - LP_{11} 模式对的布里渊增益谱中, 其相邻两个布里渊散射峰的频率间隔较宽、增益峰值较大且峰值相差较小. 通过优化光纤结构参数, 提高了基于 LP_{01} - LP_{11} 模式对布里渊增益谱的温度和应变传感性能, 最小误差分别为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5.67\text{ }\mu\text{e}$. 该研究对探究少模光纤中模式内及模式间的受激布里渊散射特性具有一定的指导意义, 对提升同时温度和应变传感测量的性能具有一定参考价值.

关键词: M 型少模光纤, 受激布里渊散射, 布里渊增益谱, 传感, 温度和应变

PACS: 42.65.Es, 07.07.Df, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.69.20200103

1 引言

随着光纤通信技术的发展, 单模光纤 (single mode fiber, SMF) 的传输容量已经不能满足通信系统对容量的需求^[1]. 为了解决这一问题, 研究人员提出基于少模光纤 (few mode fiber, FMF) 的模分复用技术^[2]. 受激布里渊散射 (stimulate Brillouin scattering, SBS) 是光纤中抽运波、散射波和声波之间相互作用的一种非线性效应. 当抽运光功率超过 SBS 阈值时, 抽运光通过电致伸缩效应产生声波, 声波调制折射率产生折射率光栅导致抽运波发生散射. 当光栅运动方向与抽运光同向时, 产生的散射光为频率下移的斯托克斯光; 反之当光栅运动方向与抽运光反向时, 产生的散射光为频率上移的

反斯托克斯光. 在标准单模光纤中, 斯托克斯光的频移量在 11 GHz 附近. 同时, 根据斯托克斯光与抽运光的传播方向是否一致, 可将 SBS 分为前向 SBS 和后向 SBS. SBS 一方面会限制光纤传输系统的信道功率, 引入大量噪声, 影响整个系统的性能, 另一方面其特性又被广泛应用于光纤激光器^[3-5]、光纤传感器^[6]、布里渊放大器^[7]、慢光技术^[8,9]、微波信号处理^[10,11]和脉冲布里渊显微镜^[12,13]等领域.

目前单模光纤中 SBS 的理论模型已经很成熟^[14], 研究主要包括布里渊增益谱 (Brillouin gain spectrum, BGS)^[15,16]、布里渊频移^[17,18] (Brillouin frequency shift, BFS)、SBS 阈值^[19-21]以及增强^[22]或抑制^[23] SBS 效应等方面. 基于不同光纤结构^[24,25]、不同掺杂浓度^[26,27] SMF 中 SBS 特性的温度和应变传感已经被大量地研究报道.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61875008, 61275092) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gbren@bjtu.edu.cn

近几年,关于少模或者多模光纤中 SBS 特性的研究逐渐开展.不同类型的少模或多模光纤中模式内或模式间相互作用的 SBS 特性已有部分报道,例如椭圆纤芯双模光纤^[28]、四模圆芯少模光纤^[29]、大模场面积的双包层光纤^[30]、渐变折射率分布光纤^[31]、阶跃型少模光纤^[32–34]以及多模光纤^[35]等.基于少模光纤中 SBS 特性的温度和应变传感应用被广泛研究.2009年,Zou等^[36]利用熊猫型保偏光纤(polarization-maintaining fiber, PMF)中 BFS 和双折射系数实现了对温度和应变的同时传感测量,温度和应变误差分别为 0.08 °C 和 3 με,但是 PMF 的偏振对准较难实现,整个系统较为复杂.2016年,Xu等^[37]研究了在反抛物型少模光纤中基于基模模内 SBS 的温度、应变布里渊传感器,温度和应变的误差分别为 0.85 °C 和 17.4 με.2016年,Zhou等^[38]研究了基于渐变折射率分布少模光纤的布里渊传感器,其温度和应变的误差分别为 1.8 °C 和 4 με.2015年,Li等^[39]基于少模光纤中 LP₀₁和 LP₁₁模内的 SBS 特性,设计了一种温度和应变的光纤传感器,得到了温度和应变的误差分别为 0.8 °C 和 20.1 με.2019年,Fang等^[40]研究了基于椭圆纤芯少模光纤中 LP₀₁和 LP₁₁模内 SBS 特性的温度和应变传感,得到了温度和应变的误差分别为 0.28 °C 和 5.81 με,但其系统较为复杂.

普通阶跃型少模光纤(step-index few mode fiber, SI-FMF)中模式相互作用的 BGS 通常只有一个明显的散射峰,这样不利于同时进行温度和应变传感.通过对少模光纤的结构进行设计,基于模内的 SBS 特性,实现了同时温度和应变的传感^[37–40],但不同光学模式之间相互作用的 SBS 特性及其规律还需深入研究,其传感性能还有待进一步提高.

因此,基于 LP₀₁与 LP₁₁的模间后向 SBS 特性,以实现温度和应变的同时传感测量、提升测量的灵敏度和降低误差为目的,本文设计了一种纤芯折射率呈 M 型分布的少模光纤(M-shaped index few mode fiber, M-FMF),该光纤能够支持四种光学模式(LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁和 LP₀₂)的传导,分析了不同光学模式模式内和模式间相互作用的 BGS,探究了光纤结构参数(半径和折射率)对 BGS 的影响.研究表明基于 LP₀₁与 LP₁₁的模间 SBS 特性可实现同时温度和应变传感测量,提高温度和应变灵敏度,降低误差.

2 基本原理

光纤中的 SBS 是一种光学模式与声学模式的相互耦合效应.采用线偏振模(linearly polarized mode, LP)近似,对光纤中抽运波和散射波的光学模式(LP_{*m*n})进行分析.在圆均匀光波导中,线偏振模的横向电场分布满足标量 Helmholtz 方程:

$$\nabla_t^2 f(r, \theta) + [k^2 n^2(r, \theta) - \beta^2] f(r, \theta) = 0, \quad (1)$$

其中 $\nabla_t^2 = \partial^2/\partial r^2 + (1/r)\partial/\partial r + (1/r^2)\partial^2/\partial \theta^2$ 是柱坐标系下的拉普拉斯算子, $f(r, \theta)$ 表示光学模式的横向场分布, $n(r, \theta)$ 表示光纤的折射率分布, k 是与波长 λ 相关的光波数, β 是光学模式的传播常数.

在 SBS 过程中抽运波通过电致伸缩效应产生声波,声学模式(L_{*m*n})可以通过声学标量方程求解^[14]:

$$\nabla_t^2 \xi_m(r, \theta) + \left[\frac{\Omega_m^2}{V_1^2(r, \theta)} - q \right] \xi_m(r, \theta) = 0, \quad (2)$$

其中 $\xi_m(r, \theta)$ 是第 m 个声学模式的位移场分布, q 表示声学模式的传播常数, Ω_m 是第 m 个声学模式的角频率, $V_1(r, \theta)$ 表示声波的纵向声速.在后向 SBS 过程中,激励的声学模式、抽运波的光学模式和散射波的光学模式相互作用,满足相位匹配,即 $q = \beta_1 + \beta_2$, 其中 β_1 和 β_2 分别表示抽运波和散射波的传播常数.

(1) 式和 (2) 式中光纤折射率 $n(r, \theta)$ 和纵向声速 $V_1(r, \theta)$ 不仅与掺杂元素 Ge/F 的掺杂浓度有关,同时也与外界温度和应变有关^[25]:

$$\begin{aligned} & n(\omega_{\text{Ge}}, \omega_{\text{F}}, \Delta T, \Delta S) \\ &= 1.444 \times [1 + (1 \times 10^{-3} \\ &+ 3 \times 10^{-6} \Delta T + 1.5 \times 10^{-7} \Delta S) \times \omega_{\text{Ge}} \\ &+ (-3.3 \times 10^{-3} + 3.6 \times 10^{-6} \Delta T \\ &+ 7.5 \times 10^{-7} \Delta S) \times \omega_{\text{F}}], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & V_1(\omega_{\text{Ge}}, \omega_{\text{F}}, \Delta T, \Delta S) \\ &= 5944 \times [1 - (7.2 \times 10^{-3} - 4.7 \times 10^{-5} \Delta T \\ &- 2.1 \times 10^{-6} \Delta S) \times \omega_{\text{Ge}} \\ &- (2.7 \times 10^{-3} - 1.8 \times 10^{-5} \Delta T \\ &- 3.8 \times 10^{-6} \Delta S) \times \omega_{\text{F}}], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 ω_{Ge} 和 ω_{F} 分别表示掺杂元素 Ge/F 的掺杂浓

度, 单位为 wt.%; ΔT 和 ΔS 分别表示温度和应变的变化, 单位分别是 $^{\circ}\text{C}$ 和 μe .

在 SBS 过程中, 光学模式与第 m 个声学模式的非线性耦合强弱通过光学模式和声学模式的重叠积分表征, 即声光有效面积 A_m^{ao} , 表示为

$$A_m^{\text{ao}} = \frac{\iint f_1^2(r, \theta) \text{d}r \text{d}\theta \iint f_2^2(r, \theta) \text{d}r \text{d}\theta \iint \xi_m^2(r, \theta) \text{d}r \text{d}\theta}{\left[\iint \xi_m(r, \theta) f_1(r, \theta) f_2(r, \theta) \text{d}r \text{d}\theta \right]^2}, \quad (5)$$

其中 $f_1(r, \theta)$ 和 $f_2(r, \theta)$ 分别表示抽运波和散射波中光学模式的场分布, $\xi_m(r, \theta)$ 表示第 m 个声学模式的位移场分布.

由于光纤的圆对称性, 光纤中的光学场 $f(r, \theta)$ 以及声学场 $\xi_m(r, \theta)$ 可以分解为 cosine 项和 sine 项, 因此根据 (5) 式可知, 光学模式对 $\text{LP}_{m_1 n_1}$ - $\text{LP}_{m_2 n_2}$ 和声学模式 L_{mn} 之间的耦合作用遵循以下原则: 声学模式的方位角模式数必须等于两个光学模式的方位角模式数之和 (或差且不为负), 即 $m = |m_1 \pm m_2|$.

光纤中 BGS 是由不同声学模式的布里渊增益曲线叠加而成的, 且每条布里渊增益曲线均符合洛伦兹分布:

$$g_B^m(v) = \sum \frac{g_m}{A_m^{\text{ao}}} \frac{(\omega_m/2)^2}{(v - v_m)^2 + (\omega_m/2)^2}, \quad (6)$$

$$v_m = \Omega_m / (2\pi), \quad (7)$$

$$g_m = \frac{4\pi[(n_p + n_s)/2]^8 p_{12}^2}{c\lambda^3 \rho_0 v_m \omega_m}, \quad (8)$$

其中 $g_B^m(v)$ 表示总的 BGS, ω_m 是 BGS 的半高全宽, v_m 是第 m 个声学模式的频率, 即 BFS, g_m 是布里渊增益系数, 单位为 m/W , n_p 和 n_s 分别表示抽运波和散射波中光学模式的有效折射率, p_{12} 是介质的弹光系数, c 是光速, ρ_0 是密度. 本文中 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $p_{12} = 0.271$, $\rho_0 = 2202 \text{ kg/m}^3$, $\omega_m = 35 \text{ MHz}$ ^[27].

3 分析与讨论

3.1 布里渊增益谱

在 SI-FMF 中, 基模与高阶模的模式内及模式间相互作用得到的 BGS 通常只存在一个明显的散射峰. 对于如图 1 插图所示的阶跃型少模光纤, 其

LP_{01} 和 LP_{11} 模式间相互作用的 BGS 中, 声学模式 L_{11} , L_{12} 和 L_{13} 对应散射峰的峰值分别为 0.098, 0.0019 和 0.0013 $\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 相邻两个散射峰的频率间隔分别为 46 和 73 MHz. 总的 BGS 只存在一个峰值较大的散射峰, 高阶声模对应散射峰的增益峰值较小, 因此不利于多参数传感的测量.

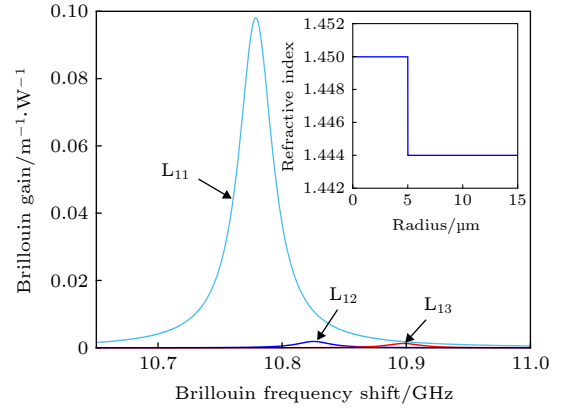


图 1 SI-FMF 中 LP_{01} - LP_{11} 模式对的 BGS (插图为 SI-FMF 的结构分布)

Fig. 1. The BGS of LP_{01} - LP_{11} mode pair in SI-FMF (Inset: The structure of SI-FMF).

因此, 为实现基于 LP_{01} 与 LP_{11} 模式间 SBS 的同时温度及应变的传感, 本文设计了一种纤芯折射率呈 M 型分布的少模光纤, 如图 2(a) 所示. 该光纤的结构参数分别为 $r_1 = 4 \mu\text{m}$; $r_2 = 6 \mu\text{m}$; $r_{\text{clad}} = 62.5 \mu\text{m}$; $n_1 = 1.454$; $n_2 = 1.4557$; $n_{\text{clad}} = 1.444$; 其中 n_1 , n_2 , r_1 和 r_2 分别表示纤芯第一层和第二层的折射率和半径. 该光纤支持四种光学模式: LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} , 其横向场分布如图 2(b)—图 2(e) 所示.

由于不同光学模式的传播常数不同, 由光学模式耦合所激励的声学模式类型不完全相同, 其传播常数和声学模式的位移场分布不同. 由 LP_{01} 模式内耦合所激励的声学模式类型是 L_{0n} , 由 LP_{11} 模式内耦合所激励的声学模式类型是 L_{0n} 和 L_{2n} , 由 LP_{01} 和 LP_{11} 模式间耦合所激励的声学模式类型是 L_{1n} , 其中 $n = 1, 2, 3, \dots$. 根据相位匹配, 不同光学模式对激励声学模式的传播常数 q 不同: $q = 11.7746 \times 10^6 \text{ rad/m}$ (LP_{01} - LP_{01}); $q = 11.7631 \times 10^6 \text{ rad/m}$ (LP_{01} - LP_{11}); $q = 11.7515 \times 10^6 \text{ rad/m}$ (LP_{11} - LP_{11}).

通过将 (1) 式和 (2) 式中求得的光学模式的场分布和声学模式的位移场分布代入 (5) 式, 可以得到光纤中不同光学模式对与所激励声学模式之间

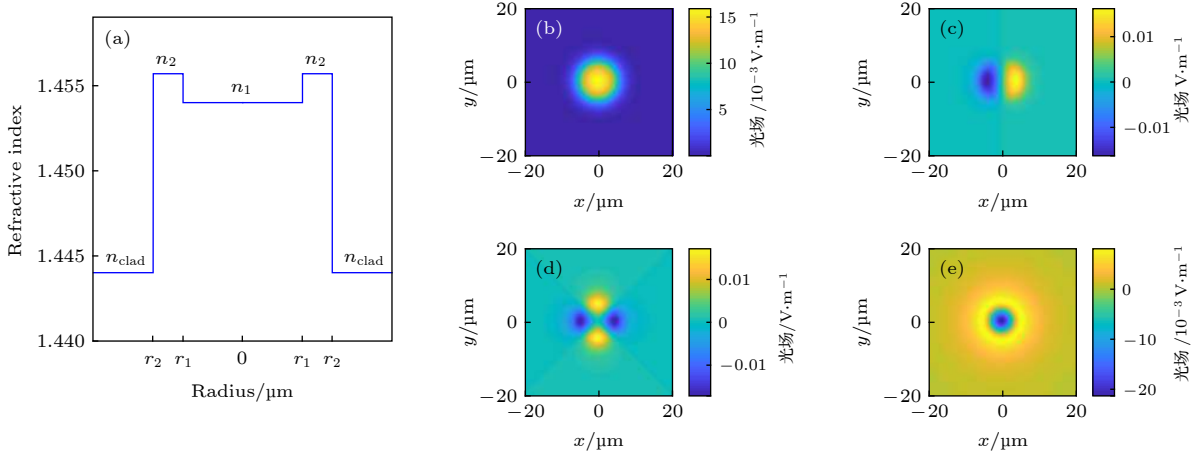


图 2 M-FMF 的结构分布以及光学模式的模场分布 (a) M-FMF 的结构分布; (b) LP₀₁; (c) LP₁₁; (d) LP₂₁; (e) LP₀₂

Fig. 2. The structure of M-FMF and the field distribution of optical modes in M-FMF: (a) The structure of M-FMF; (b) LP₀₁; (c) LP₁₁; (d) LP₂₁; (e) LP₀₂.

的声光有效面积. 声光有效面积越小, 表示抽运波中的光学模场、散射波中的光学模场与声学模场重叠越好, 则声光耦合强度越强, 布里渊增益峰值也越大. 表 1 给出了 LP₀₁-LP₀₁, LP₀₁-LP₁₁ 和 LP₁₁-LP₁₁ 三种情况下模式耦合的声光有效面积.

表 1 不同光学模式对与声学模式之间相互耦合的声光有效面积 (单位: μm²)

Table 1. Acousto-optic effective area by the coupling between different optical mode pairs and acoustic modes (in μm²).

	LP ₀₁ -LP ₀₁	LP ₀₁ -LP ₁₁	LP ₁₁ -LP ₁₁	
	<i>m</i> = 0	<i>m</i> = 1	<i>m</i> = 0	<i>m</i> = 2
L _{<i>m</i>1}	251.63	208.71	156.24	180.74
L _{<i>m</i>2}	162.48	449.52	1.65 × 10 ³	1.09 × 10 ³
L _{<i>m</i>3}	2.12 × 10 ⁵	4.54 × 10 ⁴	3.82 × 10 ³	1.11 × 10 ⁴

将上述声光有效面积代入 (6) 式中, 再结合 (7) 式和 (8) 式, 可得到不同光学模式对的 BGS, 其中 LP₀₁-LP₀₁, LP₀₁-LP₁₁ 和 LP₁₁-LP₁₁ 三种模式对的 BGS 如图 3 所示. 图 3 中, 虚线表示总的 BGS, 由于不同声学模式对应的 BFS 不同, 总的 BGS 由多个散射峰组成. 对于 LP₀₁-LP₀₁ 模式对的 BGS, 其声学模式 L₀₁ 和 L₀₂ 对应散射峰的频率间隔为 64 MHz, 与其相比, LP₀₁-LP₁₁ 模式对的 BGS 中声学模式 L₁₁ 和 L₁₂ 对应散射峰的频率间隔为 76 MHz, 其对应散射峰的增益值分别为 0.1004 m⁻¹·W⁻¹ 和 0.0463 m⁻¹·W⁻¹, 峰值相差较小; 声学模式 L₁₃ 对应散射峰的峰值仅为 0.00045 m⁻¹·W⁻¹, 对声学模式 L₁₁ 和 L₁₂ 对应散射峰的分析不造成影响. 同时, 本文也研究了 LP₂₁ 和 LP₀₂ 模式内和模式间, 以及与

LP₀₁, LP₁₁ 模式间的布里渊增益特性, 分别得到其相互作用的 BGS, 但这些模式对的 BGS 均存在散射峰的峰值较小、峰值相差较大或频率间隔较小的特性, 不利于温度和应变的传感研究. 此外, 在 BGS 中, 当相邻散射峰的频率间隔较小时, 随着温度和应变的变化, 相邻散射峰的频率间隔可能小于其线宽, 不利于测量散射峰的频率. 因此本文选取 LP₀₁-LP₁₁ 模式对的 BGS 进行温度和应变的传感分析, 首先分析改变纤芯半径 *r*₁, *r*₂ 和纤芯折射率 *n*₁, *n*₂ 对其 BGS 的影响, 如图 4 所示.

图 4(a) 中, 随着 *n*₁ 的增大, 声学模式 L₁₁ 对应散射峰的频率变化较小, 峰值先减小后增大; 声学模式 L₁₂ 和 L₁₃ 对应散射峰的频率均向低频移动, L₁₂ 模式对应散射峰的峰值逐渐增大, L₁₃ 模式对应散射峰的峰值几乎不变. 但当 *n*₁ ≥ 1.452 时, 由于 L₁₃ 模式与基模之间的耦合强度变小, 因此其散射峰逐渐消失, 此外 L₁₁ 模式和 L₁₂ 模式对应散射峰的频率间隔逐渐减小. 图 4(b) 中, 随着 *n*₂ 的增大, 三个声学模式对应的散射峰都向低频移动且峰值逐渐减小, 彼此频率间隔逐渐增大. 图 4(c) 中, 随着 *r*₁ 的增大, 声学模式 L₁₁ 和 L₁₂ 对应散射峰的峰值变化较小, 但二者频率间隔逐渐减小. 图 4(d) 中, 随着 *r*₂ 的增大, 声学模式 L₁₁ 和 L₁₂ 对应散射峰的峰值逐渐减小, 其频率间隔逐渐增大. 因此相邻两个声学模式对应散射峰的峰值和频率间隔可以通过光纤结构来控制, 以满足温度和应变传感测量的要求, 本文选取 M-FMF 的最优结构参数来研究温度和应变传感, 即 *r*₁ = 4 μm, *r*₂ = 6 μm, *r*_{clad} = 62.5 μm; *n*₁ = 1.454, *n*₂ = 1.4557, *n*_{clad} = 1.444.

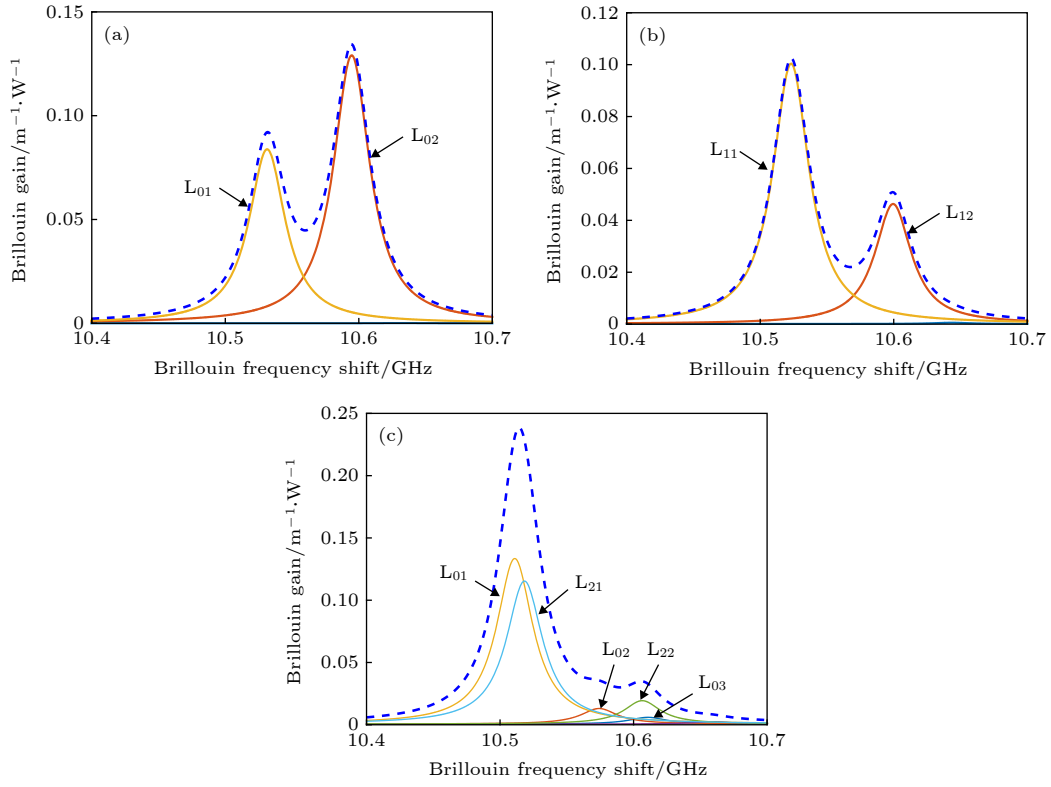


图 3 不同光学模式对的 BGS (a) LP_{01} - LP_{01} ; (b) LP_{01} - LP_{11} ; (c) LP_{11} - LP_{11}
 Fig. 3. The BGS of different optical mode pairs: (a) LP_{01} - LP_{01} ; (b) LP_{01} - LP_{11} ; (c) LP_{11} - LP_{11} .

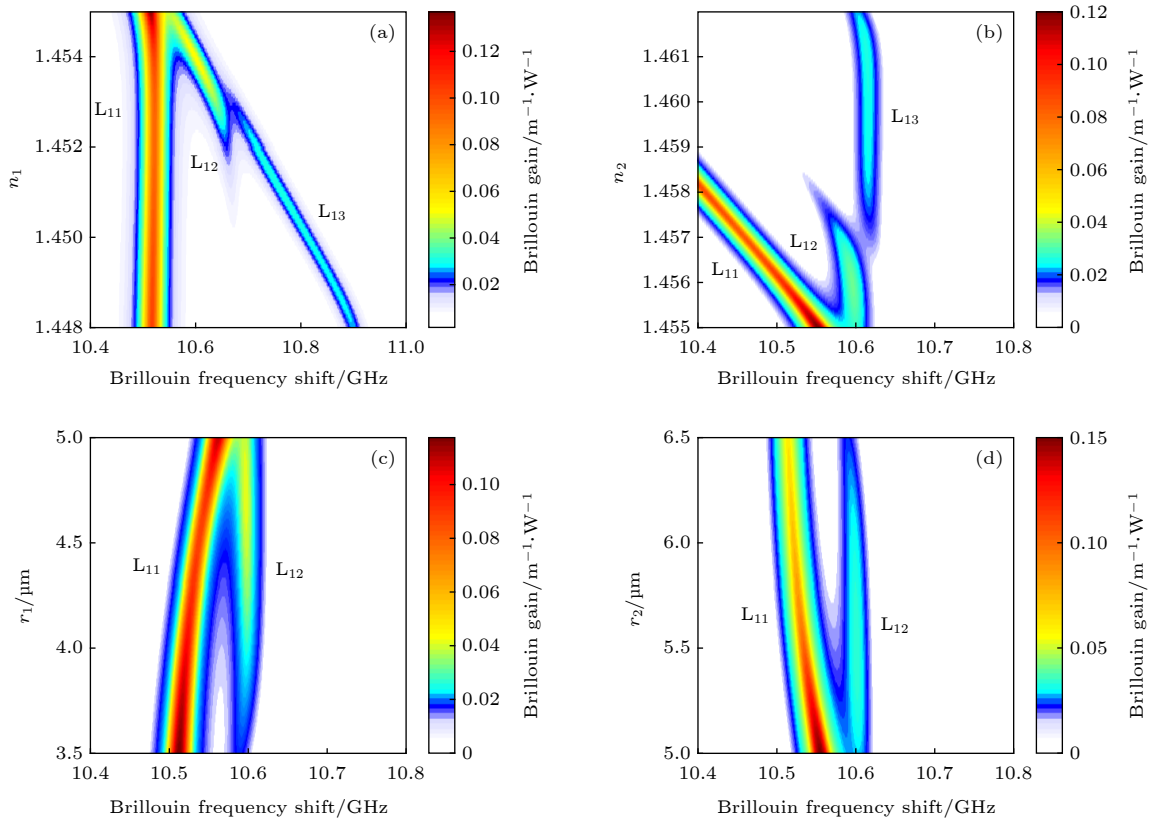


图 4 M-FMF 的结构对 LP_{01} - LP_{11} 模式对 BGS 的影响 (a) n_1 ; (b) n_2 ; (c) r_1 ; (d) r_2
 Fig. 4. The BGS of LP_{01} - LP_{11} mode pair in M-FMF versus: (a) n_1 ; (b) n_2 ; (c) r_1 ; (d) r_2 .

3.2 布里渊传感性能

基于 LP_{01} - LP_{11} 模式对的 BGS, 采用优化结构的 M-FMF, 研究了温度和应变同时传感的性能. 由 LP_{01} - LP_{11} 模式对激励的声学模式 L_{11} 和 L_{12} 的位移场分布如图 5 所示, 其中 L_{11} 模式主要分布在纤芯第二层, L_{12} 模式主要分布在纤芯的第一层.

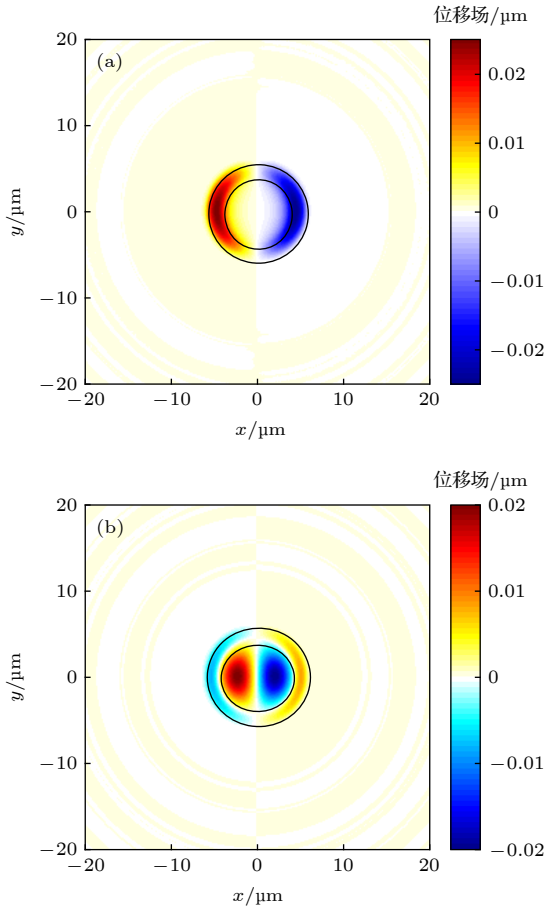


图 5 LP_{01} - LP_{11} 模式对激励的声学模式的位移场分布 (a) L_{11} ; (b) L_{12}
Fig. 5. The displacement field distribution of acoustic mode excited by the interaction of LP_{01} - LP_{11} mode pair: (a) L_{11} ; (b) L_{12} .

在 M-FMF 中, 由 LP_{01} 和 LP_{11} 相互作用得到的 BGS 主要包含两个声学模式对应的散射峰. 根据 (3) 式和 (4) 式, 温度和应变会引起纤芯折射率和纵向声速的变化, 改变声学模式 L_{11} 和 L_{12} 的分布特性, 导致 L_{11} 和 L_{12} 对应散射峰的 BFS 随温度和应变发生变化, 且散射峰 BFS 变化的频移量不同, 因此可通过测量两个散射峰 BFS 变化的频移量实现温度和应变的同时传感. 声学模式 L_{11} 和 L_{12} 对应散射峰的 BFS 与温度 ΔT 和应变 ΔS 之间呈线性

关系^[41], 即 (9) 式, 同时温度和应变会造成不同散射峰 BFS 变化的频移量不同, 因此, 对于不同散射峰, 其温度系数和应变系数不同. 根据 (10) 式, 可通过测量 BGS 中两个声学模式对应散射峰变化的频移量得到外界温度和应变的改变量, 实现温度和应变的同时传感.

$$\begin{pmatrix} \Delta v_{L_{11}} \\ \Delta v_{L_{12}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_T^{L_{11}} & C_S^{L_{11}} \\ C_T^{L_{12}} & C_S^{L_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{pmatrix}. \quad (9)$$

当 $C_T^{L_{11}} C_S^{L_{12}} - C_T^{L_{12}} C_S^{L_{11}} \neq 0$ 时, 由 (9) 式可得

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{pmatrix} = \frac{1}{C_T^{L_{11}} C_S^{L_{12}} - C_T^{L_{12}} C_S^{L_{11}}} \begin{pmatrix} C_S^{L_{12}} & -C_S^{L_{11}} \\ -C_T^{L_{12}} & C_T^{L_{11}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta v_{L_{11}} \\ \Delta v_{L_{12}} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

其中 $C_T^{L_{1n}}$ 和 $C_S^{L_{1n}}$ ($n = 1, 2$) 分别表示声学模式 L_{11} 和 L_{12} 对应散射峰的温度和应变系数, $\Delta v_{L_{1n}}$ ($n = 1, 2$) 表示声学模式 L_{11} 和 L_{12} 对应散射峰 BFS 的频移量, ΔT 和 ΔS 分别表示温度和应变的变化量, 单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 和 $\mu\epsilon$.

图 6 表示 LP_{01} - LP_{11} 模式对的 BGS 随温度和应变的变化, 其中虚线表示 L_{11} 模式对应的散射峰, 实线表示 L_{12} 模式对应的散射峰. 可以发现, 随着温度 (应变) 的增加, 两个散射峰均向高频移动, L_{11} 模式对应散射峰的峰值逐渐增加, 而 L_{12} 模式对应散射峰的峰值逐渐减小. 由于随着温度和应变的增加, 声学模式 L_{11} 和 L_{12} 逐渐向纤芯中心靠拢, 且 L_{11} 模式的峰值逐渐减小, L_{12} 模式的峰值逐渐增大, 而光学模式的模场分布几乎不变, 导致 $A_{L_{11}}^{a_0}$ 逐渐减小, $A_{L_{12}}^{a_0}$ 逐渐增大, 得到其散射峰的峰值变化刚好相反. 图 7 表示声学模式 L_{11} 和 L_{12} 对应散射峰的 BFS 随温度和应变的变化. 可以发现, 两个散射峰的 BFS 随温度和应变呈线性变化, 通过线性拟合得到对应于声学模式 L_{11} 和 L_{12} 的温度和应变系数, 即 $C_T^{L_{11}} = 4.3400 \text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$, $C_T^{L_{12}} = 3.9315 \text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$, $C_S^{L_{11}} = 0.19373 \text{ MHz}/\mu\epsilon$, $C_S^{L_{12}} = 0.17715 \text{ MHz}/\mu\epsilon$.

除了温度和应变系数之外, 温度和应变的误差也是评估传感性能的一个重要指标. 根据 (10) 式, 当散射峰 BFS 的频移量等于 BFS 精度时, 可得到温度和应变的误差 δT 和 δS . 一般假定 BGS 中散射峰 BFS 的精度为 0.1 MHz ^[25], 因此, 将声学模式 L_{11} 和 L_{12} 对应散射峰 BFS 的频移量 $\Delta v_{L_{11}} = \Delta v_{L_{12}} = 0.1 \text{ MHz}$ 代入 (10) 式, 得到温度和应变的误差分别

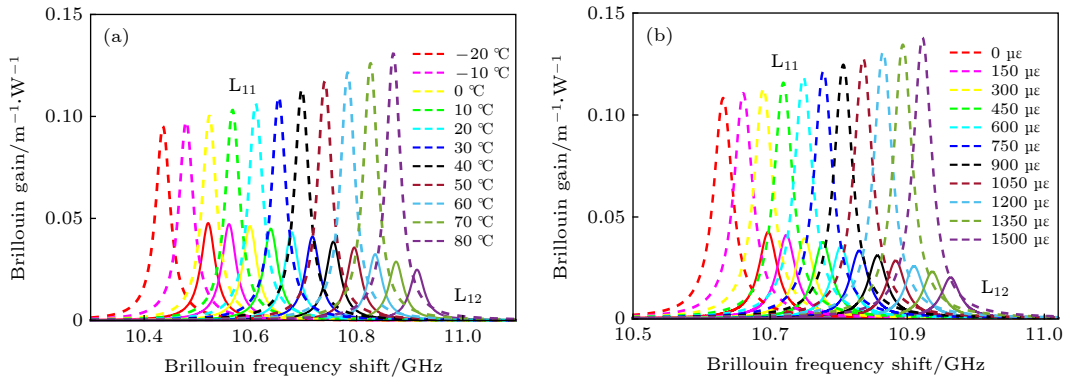


图6 LP₀₁-LP₁₁模式对的BGS随温度和应变的变化 (a) BGS随温度的变化; (b) BGS随应变的变化
Fig. 6. The BGS of LP₀₁-LP₁₁ mode pair versus: (a) Temperature; (b) strain.

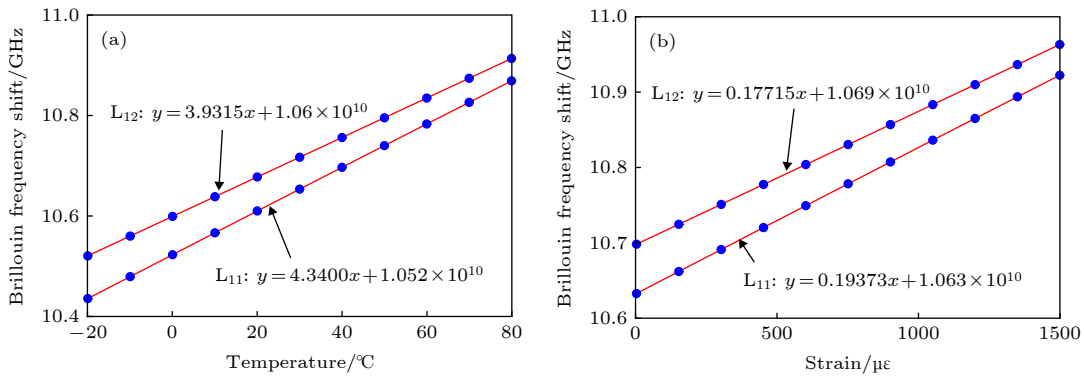


图7 声学模式L₁₁和L₁₂对应散射峰的BFS随温度和应变的变化 (a) BFS随温度的变化关系; (b) BFS随应变的变化关系
Fig. 7. The BFS corresponding to L₁₁ and L₁₂ acoustic modes versus: (a) Temperature; (b) strain.

表2 不同研究报道中基于SBS的温度应变系数和误差

Table 2. The coefficients and errors of temperature and strain based on SBS in different literatures.

Fiber	C_T^1 /MHz·°C ⁻¹	C_T^2 /MHz·°C ⁻¹	C_S^1 /MHz·°C ⁻¹	C_S^2 /MHz·°C ⁻¹	δT /°C	δS / $\mu\epsilon$
M-FMF	4.3400	3.9315	0.19373	0.17715	0.23	5.67
M-SMF ^[25]	1.5187	1.1642	0.06640	0.05280	0.47	12.30
SSMF ^[26]	1.1900	1.1500	0.06228	0.05009	0.93	19.48
SMF ^[27]	1.1900	1.1190	0.03560	0.04030	0.90	28.80
IPGIF ^[37]	0.74323	0.9016	0.04202	0.03825	0.85	17.40
GIFMF ^[38]	5.2700	4.300	0.23700	0.18900	1.80	41.00
c-core FMF ^[39]	1.0169	0.9909	0.05924	0.04872	1.20	21.90
e-core FMF ^[40]	1.2420	1.2780	0.06130	0.03640	0.37	7.61

为 $\delta T = 0.23$ °C, $\delta S = 5.67$ $\mu\epsilon$. 表2列出了不同研究报道中基于SBS的温度/应变系数和误差^[25-27,37-40], 其中 C_T^i 和 C_S^i ($i = 1, 2$) 分别表示对应于不同散射峰的温度和应变系数. 与之相比, 本文所研究的温度和应变的传感性能更优越, 灵敏度更高, 温度和应变误差更小. 这是由于随着温度、应变的增大, 光学模式和声学模式的有效折射率和有效声速逐渐增大, BFS与二者成正比, 且M-FMF中模式有

效折射率和有效声速随温度和应变的变化率更大, 故温度和应变的灵敏度较高.

4 结论

普通阶跃型少模光纤中LP₀₁-LP₁₁模式间的BGS只存在一个明显的散射峰, 不利于实现同时温度和应变传感. 针对此种情况, 本文设计了一种

纤芯折射率呈 M 型分布的少模光纤, 计算了不同光学模式对与所激励声学模式的声光有效面积, 并由此分析对比了四种光学模式 (LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02}) 模式内和模式间的 BGS, 表明 LP_{01} - LP_{11} 模式对的 BGS 中相邻散射峰的频率间隔较宽、增益峰值较大且峰值相差较小, 更有利于实现温度和应变的同时传感. 通过分析光纤结构 (半径和折射率) 对 LP_{01} - LP_{11} 模式对 BGS 中相邻散射峰的峰值增益和频率间隔的影响, 优化光纤结构, 提高了基于 M-FMF 中 LP_{01} 与 LP_{11} 模式间 SBS 的温度和应变同时传感的性能, 得到温度和应变的误差分别为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5.67\text{ }\mu\text{e}$.

参考文献

- [1] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, Foschini G J, Goebel B 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 662
- [2] Randel S, Ryf R, Sierra A, Winzer P J, Gnauck A H, Bolle A C, Essiambre R J, Peckham D W, McCurdy A, Lingle R 2011 *Opt. Express* **19** 16697
- [3] Smith S P, Zarinetchi F, Ezekiel S 1991 *Opt. Lett.* **16** 393
- [4] Cowie G J, Yu D, Chieng Y T 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1198
- [5] Li B W, Wei X M, Wang X, Wong K K Y 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 2387
- [6] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P 2004 *Opt. Lett.* **29** 26
- [7] Zadok A, Zilka E, Eyal A, Thévenaz L, Tur M 2008 *Opt. Express* **16** 21692
- [8] Liu Y 2012 *M.S. Dissertation* (Shanxi: Northwest University) (in Chinese) [刘玉 2012 硕士学位论文 (陕西: 西北大学)]
- [9] Herráez M G, Song K Y, Thévenaz L 2006 *Opt. Express* **14** 1395
- [10] Loayssa A, Benito D, Garde M J 2000 *Opt. Lett.* **25** 1234
- [11] Preussler S, Schneider T 2015 *Opt. Eng.* **55** 031110
- [12] Ballmann C W, Meng Z K, Traverso A J, Scully M O, Yakovlev V V 2017 *Optica* **4** 124
- [13] Krug B, Koukourakis N, Czarske J W 2019 *Opt. Express* **27** 26910
- [14] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D 2010 *Adv. Opt. Photonics* **2** 1
- [15] Koyamada Y, Sato S, Nakamura S, Sotobayashi H, Chujo W 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 631
- [16] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1842
- [17] Zou L F, Bao X Y, Afshar S, Chen L 2004 *Opt. Lett.* **29** 1485
- [18] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M 1989 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **1** 107
- [19] Mocofoanescu A, Wang L, Jain R, Shaw K D, Gavrielides A, Peterson P, Sharma M P 2005 *Opt. Express* **13** 2019
- [20] Floch S L, Cambon P 2003 *J. Opt. Soc. Am. A* **20** 1132
- [21] Wang Z B, Shao B B, Zhang L, Yan Y, Yang P L, Chen S W 2011 *Laser Optoelect. Prog.* **48** 090603 (in Chinese) [王振宝, 邵碧波, 张磊, 闫燕, 杨鹏翎, 陈绍武 2011 激光与光电子学进展 **48** 090603]
- [22] Afshar S, Kalosha V P, Bao X Y, Chen L 2005 *Opt. Lett.* **30** 2685
- [23] Liu A P 2007 *Opt. Express* **15** 977
- [24] Li H L, Zhang W, Huang Y D, Peng J D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 104211
- [25] Dong Y, Ren G B, Xiao H, Gao Y X, Li H S, Xiao S Y, Jian S S 2017 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **29** 1955
- [26] Xing C, Ke C J, Guo Z, Yang K Y, Wang H Y, Zhong Y B, Liu D M 2018 *Opt. Express* **26** 28793
- [27] Xiao S Y, Dong Y, Xiao H, Ren G B, Jian S S 2018 *IEEE Sens. J.* **18** 1087
- [28] Song K Y, Kim Y H, Kim B Y 2013 *Opt. Lett.* **38** 1805
- [29] Song K Y, Kim Y H 2013 *Opt. Lett.* **38** 4841
- [30] Ke W W, Wang X J, Tang X 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 305
- [31] Minardo A, Bernini R, Zeni L 2014 *Opt. Express* **22** 17480
- [32] Song K Y, Kim Y H 2014 *Optical Fiber Communications Conference* San Francisco, CA, USA, March 9 -13, 2014 pW3D.6
- [33] Zhang Y J, Gao H L, Fu X H, Tian Y S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 024207 (in Chinese) [张燕君, 高皓雷, 付兴虎, 田永胜 2017 物理学报 **66** 024207]
- [34] Wang X, Qin Z J, Xiong X M, Zhang W T 2019 *Laser Optoelect. Prog.* **56** 162901 (in Chinese) [王旭, 秦祖军, 熊显名, 张文涛 2019 激光与光电子学进展 **56** 162901]
- [35] Lü H B, Zhou P, Wang X L, Jiang Z F 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 4464
- [36] Zou W W, He Z Y, Hotate K 2009 *Opt. Express* **17** 1248
- [37] Xu Y P, Ren M Q, Lu Y, Lu P, Lu P, Bao X Y, Wang L X, Messaddeq Y, Laroche S 2016 *Opt. Lett.* **41** 1138
- [38] Zhou X, Guo Z, Ke C J, Liu D M 2016 *IEEE Photonics Conference (IPC)* Waikoloa, HI, October 2-6, 2016 p817
- [39] Li A, Wang Y F, Hu Q, Shieh W 2015 *Opt. Express* **23** 1139
- [40] Fang J, Milione G, Stone J, Peng G Z, Li M J, Ip E, Li Y W, Ji P N, Huang Y K, Huang M F, Murakami S, Shieh W, Wang T 2019 *Opt. Lett.* **44** 1096
- [41] Weng Y, Ip E, Pan Z Q, Wang T 2015 *Opt. Express* **23** 9024

Inter-mode stimulated Brillouin scattering and simultaneous temperature and strain sensing in M-shaped few-mode fiber^{*}

Li Xue-Jian Cao Min Tang Min Mi Yue-An Tao Hong
Gu Hao Ren Wen-Hua Jian Wei Ren Guo-Bin[†]

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

(Received 15 January 2020; revised manuscript received 12 March 2020)

Abstract

Stimulated Brillouin scattering (SBS) in a few-mode fiber (FMF) is of significance for the distributed temperature and strain sensing. An FMF with M-shaped refractive index distribution (M-FMF) is proposed in order to improve the performance of simultaneous temperature and strain sensing based on SBS. Propagation of four optical modes is supported by the M-FMF, so that the Brillouin gain spectrum (BGS) can be obtained by both intra-mode and inter-mode SBS. The BGSs produced by the interactions of LP₀₁-LP₀₁ mode pair, LP₀₁-LP₁₁ mode pair, and LP₁₁-LP₁₁ mode pair are analyzed, respectively. Meanwhile, the temperature and strain sensing performance based on the BGS of LP₀₁-LP₁₁ mode pair are studied in detail. Considering a common step-index FMF, only one obvious scattering peak is usually present in the BGS obtained from the interaction between different optical mode pairs, therefore, it is inconvenient to achieve multi-parameter sensing measurement. In this paper, the BGS of LP₀₁-LP₁₁ mode pair has two scattering peaks, which are contributed by the acousto-optic coupling between the acoustic modes L_{1n} ($n = 1, 2$) and the optical modes LP₀₁ and LP₁₁. The two Brillouin scattering peaks have large gain values of 0.1004 m⁻¹·W⁻¹ and 0.0463 m⁻¹·W⁻¹, respectively. More importantly, the gain difference between two Brillouin scattering peaks is small, and the frequency interval is 75 MHz, which can be applied to simultaneous temperature and strain sensing. The influences of the refractive index and the fiber core radius on the BGS of LP₀₁-LP₁₁ mode pair are studied. By selecting the optimal structure parameters, we discuss the effect of temperature and strain on the BGS of LP₀₁-LP₁₁ mode pair. The errors for simultaneous temperature and strain measurement are reduced to 0.23 °C and 5.67 με. Compared with other reported results, our obtained temperature and strain sensitivity are high and sensing errors are low in the considered M-FMF. In other words, based on the BGS of LP₀₁-LP₁₁ mode pair, the performance of temperature and strain sensing are improved in the M-FMF. This work is of great significance for studying intra-mode and inter-mode SBS in an FMF. Moreover, the results also provide a guideline for further improving the performance of simultaneous temperature and strain sensing.

Keywords: M-shaped few mode fiber, stimulated Brillouin scattering, Brillouin gain spectrum, sensing, temperature and strain

PACS: 42.65.Es, 07.07.Df, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.69.20200103

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61875008, 61275092).

[†] Corresponding author. E-mail: gbren@bjtu.edu.cn