

单模光纤中用声波导布里渊散射同时测量温度和应变

邓春雨 侯尚林 雷景丽 王道斌 李晓晓

Simultaneous measurement on strain and temperature via guided acoustic-wave Brillouin scattering in single mode fibers

Deng Chun-Yu Hou Shang-Lin Lei Jing-Li Wang Dao-Bin Li Xiao-Xiao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 240702 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.240702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.240702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于椭圆腔共振的石英增强光声光谱理论研究

Theoretical research on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy base on the resonance in an elliptical cavity

物理学报.2016, 65(19): 190701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.190701>

一种采用双换能器和摆式结构的宽频振动能量采集器

A broadband vibration energy harvester using double transducers and pendulum-type structures

物理学报.2016, 65(13): 130701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130701>

硅纳米线/氧化钒纳米棒复合材料的制备与气敏性能研究

Synthesis and gas-sensing properties of the silicon nanowires/vanadium oxide nanorods composite

物理学报.2016, 65(9): 090701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.090701>

顶栅石墨烯离子敏场效应管的表征及其初步应用

Characterization and preliminary application of top-gated graphene ion-sensitive field effect transistors

物理学报.2016, 65(8): 080701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080701>

基于中红外量子级联激光器和石英增强光声光谱的CO超高灵敏度检测研究

Research on high sensitivity detection of carbon monoxide based on quantum cascade laser and quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy

物理学报.2016, 65(6): 060701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.060701>

单模光纤中用声波导布里渊散射同时测量 温度和应变*

邓春雨 侯尚林[†] 雷景丽 王道斌 李晓晓

(兰州理工大学理学院, 兰州 730050)

(2016年4月27日收到; 2016年8月15日收到修改稿)

为解决布里渊频移同时受温度和应变影响的交叉敏感问题, 提出了用声波导布里渊散射同时检测温度和应变的传感器设计方案. 根据声波导布里渊散射中不同声模对温度和应变的敏感度不同, 设计特定的抽运光和斯托克斯光频率, 使检测的频谱图上呈现多峰放大现象. 再根据温度和应变对声模特征频率的影响, 区分出光纤所受温度和应变值. 模拟结果表明标准 SMF-28 光纤中, R_{02} 模对应的温度敏感度比 TR_{25} 模对应的温度敏感度低 0.86%, R_{02} 模对应的应变敏感度比 TR_{25} 模对应的应变剪度度高 54.1%. 由于 R_{02} 模和 TR_{25} 模对应温度敏感度近似相同, 而两者对应应变剪度度相差较大, 可以有效地区分出温度和应变对布里渊频移的影响, 从而达到温度应变同时测量的目的.

关键词: 光纤, 声波导布里渊散射, 温度, 应变

PACS: 07.07.Df, 42.65.Es, 42.81.-i, 62.65.+k

DOI: 10.7498/aps.65.240702

1 引言

自 1964 年首次观察到受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 以来, SBS 被广泛应用于激光器、光纤放大器、光纤通信网络、传感和快慢光^[1,2]等方面. 按照斯托克斯波传输方向可将 SBS 分为后向 SBS 和前向 SBS. 前向 SBS 也称声波导布里渊散射 (guided acoustic-wave Brillouin scattering, GAWBS).

利用光纤布里渊散射做成的传感器与光纤传输系统兼容, 可实现远距离实时测量与监控, 无辐射干扰, 电绝缘和抗电磁干扰性好, 测量范围宽, 具有高空间分辨率和高精度^[3,4], 主要应用在对温度或应变的传感上, 或者对两者同时传感. 但在对温度和应变同时传感时就要解决两者的交叉敏感问题. 目前解决办法主要有以下三种: 1) Bao 等^[5]提出的参考光纤法, 设计了双光纤传感器; 2) Parker

等^[6]采用的布里渊散射频移和布里渊/瑞利功率比同时测量的方法; 3) Lee 等^[7]采用的特殊光纤的双布里渊频移法. 在上述三种方法的基础上, Smith 等^[8]实现了布里渊增益和频移同时检测进而实现了温度和应变同时传感; 文献^[9, 10]使用 Landau-Placzek Ratio 和级联 Mach-Zehnder 滤波器提升了传感性能; Zou 等^[11]实现了光子晶体光纤中的双布里渊频移观测; Zou 等^[12,13]实现了在掺杂光纤中的双布里渊频移观测. 以上方法都是利用后向布里渊散射实现传感. 据我们了解, 还没有文献报道过利用光纤前向布里渊散射设计传感.

本文提出了一种利用前向 SBS 对温度和应变同时检测的传感器设计方案, 利用 GAWBS 中不同声波模式对温度和应变的敏感度不同, 通过检测两种声模对应的散射光频移, 求出相应的温度和应变, 也可以通过测量多个声模, 求平均值, 以减小其他因素对传感的影响. 该方法有效地解决了温度和应变两参数同时测量时的交叉敏感问题, 同时避免

* 国家自然科学基金 (批准号: 61665005, 61167005, 61367007) 和甘肃省自然科学基金 (批准号: 1112RJZA018, 1112RJZA017) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: houshanglin@163.com

了使用多根光纤和特殊光纤, 简化了仪器对实验材料的要求.

2 数值模型和理论分析

利用 GAWBS 设计传感器的结构如图 1 所示. 抽运光和斯托克斯光同时耦合进单模光纤时, 激起 GAWBS. 在此过程中不同声模对斯托克斯光起到不同的放大作用. 从单模光纤中输出的信号光在光谱分析仪中显示出多峰特性, 根据不同的峰值所在频率对温度和应变响应的敏感度不同, 求解出单模光纤处所受的温度值和应变值. 在 GAWBS 过程中, 布里渊频移指抽运光中心频率与斯托克斯光中心频率之差, 而这个差值为 GAWBS 过程中对应某一声模的特征频率.

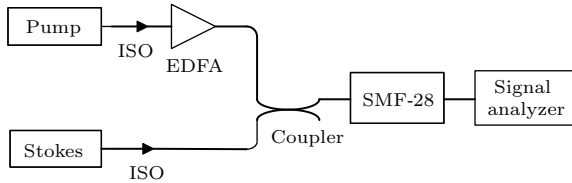


图 1 传感原理简图

Fig. 1. Schematic diagram of proposed sensor.

图 1 中 Pump 为抽运源, 为 GAWBS 过程提供能量; Stokes 为斯托克斯源, 为检测信号; ISO 为光隔离器; EDFA 为光放大器; Coupler 为光耦合器; SMF-28 为单模光纤, 处于待测量区域; Signal analyzer 为信号分析装置, 检测经过 GAWBS 后的信号变化.

GAWBS 中的声波是弹性波, 在单模光纤中的特征方程为^[14]

$$\text{Det}(b_{ij}) = 0, \quad (1)$$

式中矩阵各元素为

$$\begin{aligned} b_{11} &= (n^2 - 1 - y_{nm}^2/2)J_n(\alpha y_{nm}), \\ b_{12} &= [n(n^2 - 1) - y_{nm}^2/2]J_n(y_{nm}) \\ &\quad - (n^2 - 1)y_{nm}J_{n+1}(y_{nm}), \\ b_{21} &= (n - 1)J_n(\alpha y_{nm}) - \alpha y_{nm}J_{n+1}(\alpha y_{nm}), \\ b_{22} &= [n(n - 1) - y_{nm}^2/2]J_n(y_{nm}) \end{aligned}$$

$$+ y_{nm}J_{n+1}(y_{nm}), \quad (2)$$

其中 n 的值为横向声波位移沿圆周方向一圈最小值个数的一半, m 为声模阶数, α 为横波声速 v_s 与纵波声速 v_l 的比值, $J_n(y_{nm})$ 为 n 阶贝塞尔函数. 光纤中参与 GAWBS 的声模主要是 R_{0m} 模和 TR_{2m} 模^[15], 分别对应 $n = 0$ 和 $n = 2$.

当 $n = 0$ 时, R_{0m} 模所满足振动特征方程中对应的参数如下:

$$\begin{aligned} b_{11} &= -(1 + y_m^2/2)J_0(\alpha y_m), \\ b_{12} &= -y_m^2/2J_0(y_m) + y_mJ_1(y_m), \\ b_{21} &= -J_0(\alpha y_m) - \alpha y_mJ_1(\alpha y_m), \\ b_{22} &= -y_m^2/2J_0(y_m) + y_mJ_1(y_m). \end{aligned} \quad (3)$$

将上述参数代入 (1) 式解出特征值 y_m , 特征值与声模特征频率 f_m 的关系为^[16]

$$f_m = \frac{y_m v_l}{2\pi a}, \quad (4)$$

式中 a 为光纤半径. 当 $n = 2$ 时, TR_{2m} 模所满足振动特征方程中对应的参数如下:

$$\begin{aligned} b_{11} &= (3 - y_m^2/2)J_2(\alpha y_m), \\ b_{12} &= (6 - y_m^2/2)J_2(y_m) - 3y_mJ_3(y_m), \\ b_{21} &= J_2(\alpha y_m) - \alpha y_mJ_3(\alpha y_m), \\ b_{22} &= (2 - y_m^2/2)J_2(y_m) + y_mJ_3(y_m). \end{aligned} \quad (5)$$

将上述参数代入 (1) 式解出特征值 y_m , 特征值与声模特征频率 f_m 的关系为^[16,17]

$$f_m = \frac{y_m v_s}{2\pi a}. \quad (6)$$

对声模研究时可将 SMF-28 光纤近似看作石英圆柱, 物理参数分别为: 半径 $a = 62.5 \mu\text{m}$, 杨氏模量 $E = 72.553 \text{ GPa}$, 泊松比 $\gamma = 0.17$, 密度 $\rho = 2203 \text{ kg/m}^3$. 相应的横波声速和纵波声速分别为^[15,17-19]

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \gamma)}}, \quad (7a)$$

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1 - \gamma)}{(1 + \gamma)(1 - 2\gamma)\rho}}. \quad (7b)$$

温度和应变对材料特性的影响为^[20]

$$\rho = \rho_0 \frac{1 - 1.8329 \times 10^{-6} \Delta T + 1.753 \times 10^{-10} \Delta T^2}{(1 + \varepsilon)(1 - \gamma\varepsilon)^2}, \quad (8a)$$

$$\gamma = \gamma_0(1 + 1.66698 \times 10^{-4} \Delta T - 1.2251 \times 10^{-8} \Delta T^2)(1 + 22\varepsilon), \quad (8b)$$

$$E = E_0(1 + 1.7833 \times 10^{-4} \Delta T - 6.2419 \times 10^{-8} \Delta T^2)(1 + 8.7\varepsilon), \quad (8c)$$

式中 ρ_0, E_0, γ_0 分别是温度为 27°C 、应变为 $0 \mu\epsilon$ 时的初始密度、杨氏模量、波松比; ΔT 为温度变化量; ϵ 为所产生的应变.

受温度和应变影响, 光纤中的声模本征频率会发生偏移, 且不同声模频率偏移量对温度和应变敏感度不同, 选取其中两个声模可建立关于频移和温度及应变的关系 [11,12].

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{a0} \\ f_{b0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_a^{\Delta T} & C_a^\epsilon \\ C_b^{\Delta T} & C_b^\epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \epsilon \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 f_{a0} 或 f_{b0} 分别为温度为 27°C 、应变为 $0 \mu\epsilon$ 时某一声模的频率, $C_a^{\Delta T}$ 和 $C_b^{\Delta T}$ 分别为这两个声模对应的温度敏感度, C_a^ϵ 和 C_b^ϵ 分别为这两个声模对应的应变敏感度, ΔT 和 ϵ 分别为温度变化值和应变值, f_a 和 f_b 分别为受温度 ΔT 和应变 ϵ 影响下两声模对应的频率.

在选取声模时还需考虑该声场与光场间的耦合效率, 当声光耦合效率高时 GAWBS 增益明显. 在 GAWBS 过程中, 声学模分布在光纤横截面上, 声波的质点位移方程为 [21,22]

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - (c_{ijkl} u_{k,l})_{,j} \\ & = \epsilon_0 \chi_{kl ij} E_k E_l^* e^{i(qz - \omega t)}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中, ρ 为介质密度, u 为声波质点位移, c_{ijkl} 为刚度矩阵, ϵ_0 为真空介电常数, $\chi_{kl ij}$ 为四阶极化张量, $E_k E_l^*$ 为电场并矢, \mathbf{q} 为声模波矢量, ω 为声模频率.

斯托克斯光的增益系数与声光耦合因子成正比, 满足 [23]:

$$g_{0(m)} \propto \frac{Q_0(m)Q_1(m)}{\omega}, \quad (11a)$$

$$Q_0(m) = \int_0^{2\pi} \int_0^a E(x, y)^2 u(x, y) r dr d\varphi, \quad (11b)$$

$$\begin{aligned} Q_1(m) &= \int_0^{2\pi} \int_0^a \nabla_{\perp}^2 E(x, y)^2 u(x, y) \\ &\quad \times r dr d\varphi, \end{aligned} \quad (11c)$$

式中 $g_{0(m)}$ 为增益系数, $Q_0(m)$ 和 $Q_1(m)$ 为声光耦合因子, $E(x, y)$ 和 $u(x, y)$ 分别为电场基模分布和声场位移分布.

在 GAWBS 过程中, 每个声模的特征频率等于抽运光和斯托克斯光之间的频率差, 且在此过程中斯托克斯光信号被放大 [16]. 本文利用这一性质, 通过分析温度或应变对声模特征频率的影响, 进而得出温度或应变对 GAWBS 频移的影响. 上述分析是对传感器的设计原理的描述, 而传感器的使用过程

是一个逆向过程, 由光谱仪检测到宽谱信号光放大的频率点, 再利用已得出的温度或应变对 GAWBS 频移的影响, 计算得出传感光纤处温度和应变的值. 在实际传感过程中, 也可测量多个声模对应的输出信号增益峰, 从而实现多参数检测, 提升传感灵敏度和精确度.

3 数值计算

以 SMF-28 光纤为传感光纤, 数值计算了径向模 R_{0m} 模和扭转径向模 TR_{2m} 模对应不同阶数的声模本征频率、不同声模对应的温度敏感度和应变敏感度、 R_{02} 模和 TR_{25} 模本征频率随温度和应变的变化曲线以及双布里渊频移对应的温度或应变值. 在此过程中, 设定抽运波为连续单频波, 输入斯托克斯波为 45 MHz 带宽的连续波.

3.1 R_{0m} 模和 TR_{2m} 模对应的声波导布里渊频移

分别把 (4) 和 (6) 式代入 (1) 式, 得到 R_{0m} 模和 TR_{2m} 模对应的 GAWBS 频移如图 2 所示, m 为声模对应的阶数.

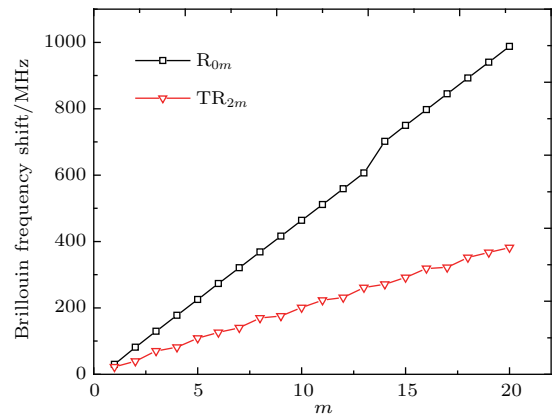


图 2 不同阶声模对应的 GAWBS 频移

Fig. 2. GAWBS frequency shifts of different order of acoustic modes.

从图 2 可以看出: R_{0m} 模阶数从 1 到 20 变化过程中, 特征频率由 30.1139 MHz 增大到 987.4927 MHz , 且在 600 MHz 以内, 相邻阶数频率之差约为 50 MHz ; TR_{2m} 模阶数从 1 到 20 变化过程中, 特征频率由 22.3864 MHz 增大到 381.7728 MHz . 与 R_{0m} 模相比, TR_{2m} 模的特征频率整体分布更密集, 且间隔不均等, 同阶频率较低. 计算结果和参考文献 [16] 的实验结果一致.

3.2 R_{0m} 模和 TR_{2m} 模对应的温度和应变敏感度

将 (8) 式分别代入 (4) 和 (6) 式中, 可得温度和应变对声波导布里渊频移的影响, 进而得出不同声模对应的温度敏感度和应变敏感度.

从图 3 (a) 可以看出, 随着 R_{0m} 模阶数增大, 声模本征频率对应的温度和应变敏感度也线性增大, 两者的变化幅值都很大. 从图 3 (b) 可以看出, 随着 TR_{2m} 模阶数增大, 声模本征频率对应的温度和应变敏感度变化较为复杂: 在阶数从 1 到 6 变化过程中, 温度敏感度和应变敏感度都逐渐增大, 在阶数从 6 到 20 变化过程中, 温度敏感度和应变敏感度呈波动变化, 且两者随阶数增大波动的趋势一致, 波动过程中应变敏感度波动幅度比温度敏感度波动幅度大.

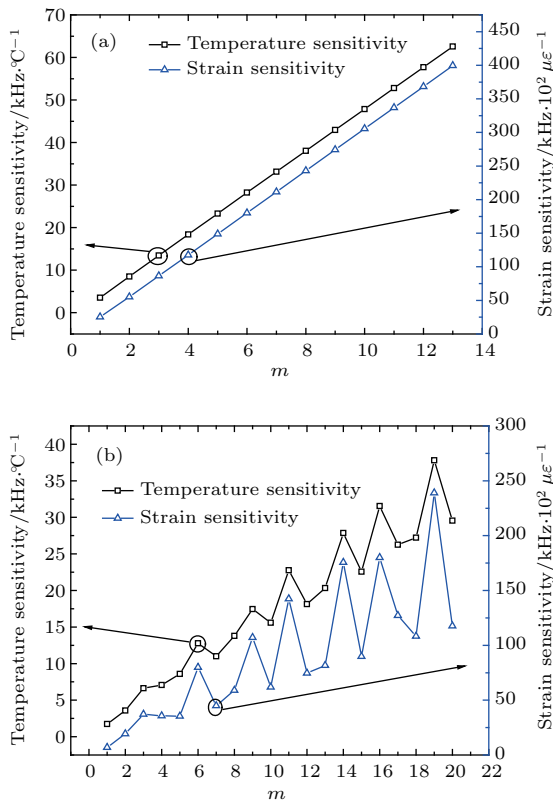


图 3 (a) R_{0m} 模和 (b) TR_{2m} 模的温度敏感度和应变敏感度

Fig. 3. Temperature sensitivity and strain sensitivity of (a) R_{0m} and (b) TR_{2m} acoustic modes.

3.3 不同声模受温度和应变的影响

在设计温度应变传感器过程中, 光源的设定主要考虑以下三个因素: 1) 信号源为宽谱光源, 抽运源为窄带光源, 抽运源频率比信号源频率高, 抽运

源与信号源频率之差是一个频率范围, 在这个频率范围内要存在两个或两个以上声模本征频率; 2) 选取的两个声模对应的本征频率不能太接近 (频差小于 5 MHz), 避免在接收端相互干扰, 也不宜相差太大, 以减小对信号源的要求; 3) 在 GAWBS 过程中声模对信号光的放大作用越大越易检测.

综合上述三个影响因素, 以及参考文献 [24] 中的实验结果, 本文使用频率为 f_p 的激光源为抽运源, 选取频段为 $f_p - 120 \text{ MHz} - f_p - 75 \text{ MHz}$ 的光源为信号源. 在 GAWBS 过程中, 信号源功率放大点所对应的声模分别是 R_{02} 模和 TR_{25} 模. R_{02} 模和 TR_{25} 模对应的布里渊频率受温度和应变的影响如图 4 所示.

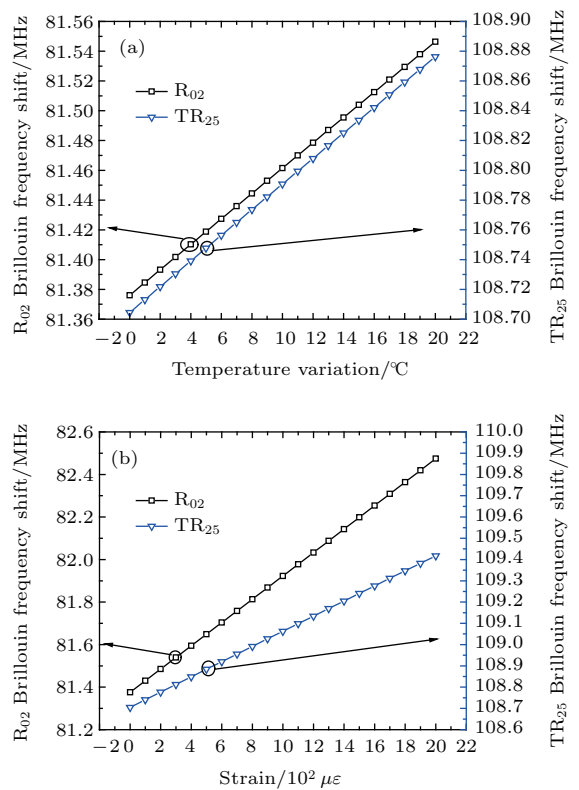


图 4 R_{02} 模和 TR_{25} 模对应布里渊频移分别随 (a) 温度和 (b) 应变的变化

Fig. 4. Variations of the R_{02} and TR_{25} Brillouin frequency shift along with (a) temperature or (b) strain, respectively.

从图 4 (a) 可以看到, R_{02} 模和 TR_{25} 模的频移都随温度的增大而增大, 并且变化幅度基本一致; 从图 4 (b) 中可以得到, R_{02} 模和 TR_{25} 模的频移都随应变的增大而增大, 但变化幅度相差较大. 根据图 4 可得到 R_{02} 模对应的温度敏感度和应变敏感度分别为 $8.51 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 和 $0.549 \text{ kHz}/\mu\epsilon$, TR_{25} 模对应的温度敏感度和应变敏感度分别为 $8.59 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 和

0.356 kHz/ $\mu\epsilon$, 满足 (9) 式中系数矩阵行列式不为零的要求. 在实际检测过程中, 单模光纤同时受温度和应变影响, 产生的频移是受两者影响之和. 所以每个声模对应的 GAWBS 频移是关于温度和应变的二维函数. R_{02} 模和 TR_{25} 模产生的 GAWBS 频移分别在 81 MHz 和 108 MHz 附近, 频移受温度和应变影响的结果如图 5 所示.

从图 5 可以得出: 对于 R_{02} 模或 TR_{25} 模, 温度不变、应变增大时, 频移随应变线性增大, 且两者增大值相差较大; 应变不变、温度增大时, 频移随温度

线性增大, 且两者增大值几乎相同; 温度和应变都增大时频移也随之增大, 且增大值与变化的温度和应变呈一次线性关系.

通过图 5 可以看出所选两声模满足对温度和应变同时传感的要求, 对 (9) 式进行变换得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_a^{\Delta T} & C_a^\epsilon \\ C_b^{\Delta T} & C_b^\epsilon \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_a - f_{a0} \\ f_b - f_{b0} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由 (12) 式可以根据检测到的频移, 求解出对应的温度和应变. 频移对应的温度或应变如图 6 所示.

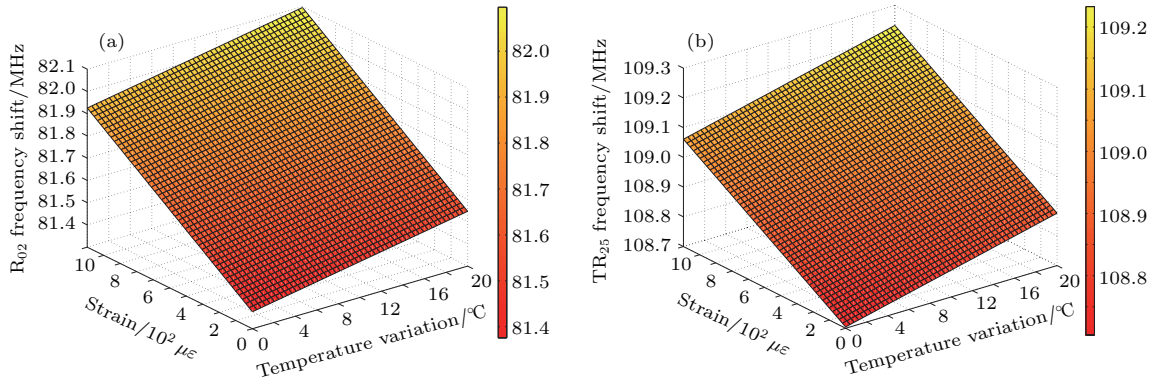


图 5 (网刊彩色) 布里渊频移受温度和应变影响 (a) R_{02} 模; (b) TR_{25} 模

Fig. 5. (color online) Brillouin frequency shift versus temperature and strain: (a) R_{02} ; (b) TR_{25} .

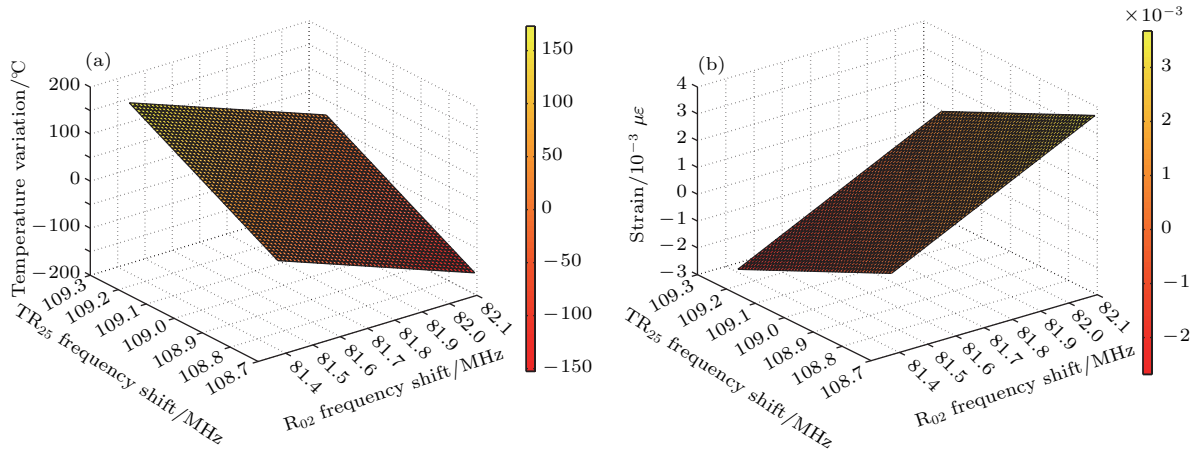


图 6 (网刊彩色) 频移对应 (a) 温度和 (b) 应变分布图

Fig. 6. (color online) Brillouin frequency shift versus (a) temperature and (b) strain for different acoustic modes.

从图 6 (a) 可以看出: 当 R_{02} 模对应的布里渊频移不变, TR_{25} 模对应的布里渊频移增大时, 单模光纤所处环境的温度增大; 当 TR_{25} 模对应的布里渊频移不变, R_{02} 模对应的布里渊频移增大时, 单模光纤所处环境的温度反而减小. 温度与声模频率对应关系与文献 [25] 中的实验结果一致. 从图 6 (b)

可以看出, 当 R_{02} 模对应的布里渊频移不变, TR_{25} 模对应的布里渊频移增大时, 检测单模光纤所处受应变值减小; 当 TR_{25} 模对应的布里渊频移不变, R_{02} 模对应的布里渊频移增大时, 检测单模光纤所处受应变值增大. 应变与声模频率对应关系与文献 [26] 中的实验结果一致. 出现这样结果的原因是

当温度(或应变)变大时,要保持某一声模特征频率不变,需要使所受应变(或温度)减小,而不同声模的温度敏感度或应变敏感度不同,从而产生对温度或应变的不同响应.图6中温度或应变与声模间的关系可由文献[25, 26]得到佐证,若要验证温度和应变同时传感的可行性,可参考文献[25—27]中的实验装置.

从图6可以看出, R_{02} 模和 TR_{25} 模的布里渊频移分布对应唯一的温度和应变.通过频谱仪得出 81 MHz 和 108 MHz 附近的双峰位置,可以在图6中得到对应的温度和应变.需要注意的是,图6中频移是抽运波频率与斯托克斯波某一峰值所在频率之差,而非从光谱仪中检测到的斯托克斯波峰值对应的频率.

4 结 论

利用光纤中布里渊散射特性设计的传感器有众多独具的优势,已经得到广泛的应用.但由于传感过程受温度和应变影响存在交叉敏感,传感器的应用范围受到很大的限制.通过理论分析和仿真计算得出, GAWBS 过程中,斯托克斯光受不同声模放大作用,在输出频谱上产生多个增益峰.本文通过研究 R_{02} 模和 TR_{25} 模对斯托克斯光的影响发现: R_{02} 模和 TR_{25} 模对应的输出信号增益峰频率随温度增加下移,且下移距离近似相同; R_{02} 模和 TR_{25} 模对应的输出信号增益峰频率随应变增加下移,且下移距离相差较大.根据输出信号两个峰值频率与参考情况两频率的差值,计算出相应的温度和应变.这种设计方案有效地解决了传感器对温度和应变同时测量过程中产生的交叉问题,同时避免了已有解决方案中的对特殊光纤的使用、对光谱仪精度要求过高、结构复杂等问题.

参考文献

- [1] Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P 1964 *Phys. Rev. Lett.* **12** 592
- [2] Garmire E, Townes C H 1964 *Appl. Phys. Lett.* **5** 84
- [3] Hou S L, Xue L M, Li S P, Liu Y J, Xu Y Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134206 (in Chinese) [侯尚林, 薛乐梅, 黎锁平, 刘延君, 徐永钊 2012 物理学报 **61** 134206]

- [4] Zhang C, Rao Y J, Jia X H, Chang L, Ran Z L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5523 (in Chinese) [张超, 饶云江, 贾新鸿, 苕亮, 冉曾令 2010 物理学报 **59** 5523]
- [5] Bao X, Webb D J, Jackson D A 1994 *Opt. Lett.* **19** 141
- [6] Parker T R, Farhadiroushan M, Handerek V A, Rogers A J 1997 *Opt. Lett.* **22** 787
- [7] Lee C C, Chiang P W, Chi S 2001 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **13** 1094
- [8] Smith J, Brown A, Demerchant M, Bao X Y 1999 *Appl. Opt.* **38** 5372
- [9] Kee H H, Lees G P, Newson T P 2000 *Opt. Lett.* **25** 695
- [10] Maughan S M, Kee H H, Newson T P 2001 *Meas. Sci. Technol.* **12** 834
- [11] Zou L F, Bao X Y, Afshar V S, Chen L 2004 *Opt. Lett.* **29** 1485
- [12] Zou W W, He Z Y, Kishi M, Hotate K 2007 *Opt. Lett.* **32** 600
- [13] Zou W W, He Z Y, Hotate K 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 1854
- [14] Grace O D, Goodman R R 1966 *J. Acoust. Soc. Am.* **39** 173
- [15] Zhang W Y, Hou S L, Liu Y J, Lei J L, Li X X, Wang D B, Wu G, Xu Y Z 2015 *Acta Phot. Sin.* **44** 506005 (in Chinese) [张雯豫, 侯尚林, 刘延君, 雷景丽, 李晓晓, 王道斌, 武刚, 徐永钊 2015 光子学报 **44** 506005]
- [16] Shelby R M, Levenson M D, Bayer P W 1985 *Phys. Rev. B* **31** 5244
- [17] Hou S L, Xue L M, Wang J W, Liu Y J, Wang D B, Xu Y Z 2013 *Chin. J. Lumin.* **34** 500 (in Chinese) [侯尚林, 薛乐梅, 王菊巍, 刘延君, 王道斌, 徐永钊 2013 发光学报 **34** 500]
- [18] Shiraki K, Ohashi M 1992 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **4** 1177
- [19] Zhao L J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6219 (in Chinese) [赵丽娟 2010 物理学报 **59** 6219]
- [20] Li H L, Zhang W, Huang Y D, Peng J D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 104211
- [21] Beugnot J C, Laude V 2012 *Phys. Rev. B* **86** 224304
- [22] Laude V, Beugnot J C 2013 *AIP Adv.* **3** 042109
- [23] Wang J, Zhu Y H, Zhang R, Gauthier D J 2011 *Opt. Express* **19** 5339
- [24] Ohashi M, Shibata N, Shirakai K 1992 *Electron. Lett.* **28** 900
- [25] Tanaka Y, Ogusu K 1998 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 1769
- [26] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M 1989 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **1** 107
- [27] Tanaka Y, Ogusu K 1999 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **11** 865

Simultaneous measurement on strain and temperature via guided acoustic-wave Brillouin scattering in single mode fibers*

Deng Chun-Yu Hou Shang-Lin[†] Lei Jing-Li Wang Dao-Bin Li Xiao-Xiao

(School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(Received 27 April 2016; revised manuscript received 15 August 2016)

Abstract

During the last decade, fiber sensor has drawn extensive attention due to its flexible, insulating, and readily operating in most measurement environment. But generally, fiber sensor is sensitive to more than one environmental parameter at the same time, so the cross sensitivity limits the application of the sensor. In the present work, a novel design scheme of sensing simultaneously temperature and strain via guided acoustic-wave Brillouin scattering is proposed for resolving the cross sensitivity induced by temperature and strain in single mode fibers. In the guided acoustic-wave Brillouin scattering which occurs due to the interaction between two optical co-propagating waves and the transverse acoustic wave in optical fiber, multi spectrum peaks appear when the frequencies of pump and Stokes are appropriate. Brillouin frequency shift is dependent on elastic property of fiber material such as sound velocity, density, Young's modulus, etc. and these elastic properties are influenced by the surroundings. So Brillouin spectrum changes with temperature and strain. Because different acoustic modes of guided acoustic-wave Brillouin scattering have different sensitivities to temperature and strain, characteristic frequencies of different acoustic modes shift at different levels. Then the influences of temperature and strain on elastic property of fiber material, and the relationship between material properties and characteristic frequency of each acoustic mode can be worked out, therefore the temperature and strain can be calculated by the different influences of temperature and strain on each acoustic mode. The simulation results indicate that the temperature sensitivity of R_{02} mode is 0.86% lower than that of TR_{25} in the SMF-28 fiber, but the strain sensitivity of R_{02} mode is 54.1% higher than that of TR_{25} . Temperature sensitivity of R_{02} is approximately equal to that of TR_{25} , but strain sensitivity of R_{02} is obviously different from that of TR_{25} . So the influences of temperature and strain on Brillouin frequency shift can be effectively distinguished, thereby simultaneous measurements of temperature and strain can be realized by guided acoustic-wave Brillouin scattering.

Keywords: fiber, guided acoustic-wave Brillouin scattering, temperature, strain

PACS: 07.07.Df, 42.65.Es, 42.81.-i, 62.65.+k

DOI: 10.7498/aps.65.240702

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61665005, 61167005, 61367007) and the Natural Science Foundation of Gansu Province, China (Grant Nos. 1112RJZA018, 1112RJZA017).

[†] Corresponding author. E-mail: houshanglin@163.com