

文章编号: 1005-5630(2023)01-0073-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.001.011

光纤涂层用于光频域反射仪温度传感的 仿真研究

汪路军, 辛 玮, 刘 煜, 张学典, 刘学静
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了设计用于光频域反射仪(optical frequency domain reflectometer, OFDR)温度传感的涂层光纤, 提升 OFDR 的温度灵敏度, 增加其适用场景, 从理论上分析了 1 层和 2 层涂层对单模光纤中瑞利频移温度灵敏度的影响并进行了仿真。考虑到外涂层的几何、热和机械性能, 首先, 用 Lamé 解理论分析涂层对 OFDR 瑞利频移温度灵敏度的影响; 其次, 基于温度带来的光纤轴向应变关系以及光纤与 1 层涂层之间的力平衡, 提出了仅含 1 层涂层的简化解; 最后, 针对建立的理论模型, 对 1 层以及 2 层外涂层光纤的瑞利频移温度灵敏度进行了仿真。结果表明, 瑞利频移温度灵敏度随着外涂层的杨氏模量、半径和热膨胀系数的增加而增加, 而与涂层泊松比几乎无关。本研究结果将有助于提高 OFDR 在高温度灵敏度和低温场景中的应用。

关键词: 光纤; 涂层; 光频域反射仪; 温度灵敏度
中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

Simulation of optical fiber coating for OFDR temperature sensing

WANG Lujun, XIN Wei, LIU Yu, ZHANG Xuedian, LIU Xuejing
(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to design coated fiber for optical frequency domain reflectometer (OFDR) temperature sensing, improve the temperature sensitivity of OFDR and increase its applicable scenarios, this paper theoretically analyzes and simulates the effects of one and two layers of coating on the temperature sensitivity of Rayleigh frequency shift in single-mode fiber. Firstly, the effects are analyzed by using the Lamé solution theory in term of the geometrical, thermal and mechanical properties of the coating. Secondly, a simplified solution with only one layer of coating is proposed based on the relationship of axial strain in optical fiber caused by temperature and the

收稿日期: 2022-08-02

第一作者: 汪路军(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光纤传感。E-mail: 1259832098@qq.com

通信作者: 张学典(1974—), 男, 教授, 研究方向为光电检测技术与器件、光纤传感技术等。
E-mail: xdzhang@usst.edu.cn

force balance between optical fiber and one layer of coating. Finally, the temperature sensitivity of Rayleigh frequency shift of the one-layer and two-layer coated optical fiber is simulated on the basis of the established theoretical model. The results show that the sensitivity increases with the increase of Young's modulus, radius and thermal expansion coefficient of the outer coating. However, it is almost independent of Poisson's ratio of the coating. The results of this paper could broaden the application of OFDR in high temperature sensitive and cryogenic temperature scenarios.

Keywords: fiber; coating; optical frequency domain reflectometer; temperature sensitivity

引 言

近几十年来, 分布式光纤传感器因其质量轻、抗腐蚀、抗电磁干扰等优点引起人们广泛关注^[1]。分布式光纤传感器通过测量周围环境沿传感光纤的变化实现对温度、应变等参量测量。相关技术已实现了应用, 如基于布里渊散射的布里渊光时域分析仪、基于瑞利散射^[2]的光时域反射仪、光频域反射仪等。其中的光频域反射技术因其高空间分辨率、宽动态范围等诸多优势而备受关注^[3]。

光纤涂层不仅有保护纤芯的作用, 对测量结果也有着重要影响。例如: 光纤涂层一方面可以提升光纤在恶劣环境下的适应能力^[4], 增强光纤传感器的性能; 另一方面也会影响杨氏模量^[5]、湿度^[6]、温度^[7]等物理量的测量。近来, 已有关于光纤涂层热致应变效应^[8]对温度测量影响的相关研究。在温度传感中, 涂层可以提高各种温度传感器的温度灵敏度, 如光纤布拉格光栅^[9-11]、布里渊光时域分析仪^[12]、相干光时域反射仪^[13]以及光频域反射仪 (optical frequency domain reflectometer, OFDR)^[14]等。有研究成果已经证实了不同材质 (例如各种聚合物、有机改性陶瓷、铝等) 的涂层对温度灵敏度具有增强作用, 因此有必要对涂层展开相关研究。

当 OFDR 使用涂层光纤作为传感光纤测量温度变化时, 由于热致应变, 其互相关解调出的瑞利散射谱会产生应变耦合位移^[15], 利用这个效应, 可以使用涂层光纤提高温度灵敏度。这将扩展 OFDR 的使用场景, 使其可应用于一些需

要高温灵敏度以及低温环境下的测量。然而, 目前涂层光纤在 OFDR 中的影响研究较少且没有一套完整、系统的理论。因此, 对于涂层在 OFDR 温度灵敏度中的影响仍需做进一步研究。

本文首先综合考虑了外部涂层的几何、热和机械性能, 理论上分析了涂层参数对于瑞利频移温度灵敏度的影响, 使用 Lamé 解建立了方程并进行求解。接着对仅含 1 层的涂层进行了简化分析并求解。然后以铝涂层光纤为例, 使用两种解法进行了仿真, 并对结果进行比较。为了进一步验证涂层对于瑞利频移温度灵敏度的影响, 不再局限某一种材料, 对 2 层外涂层进行了仿真。最后将 1 层外涂层和 2 层外涂层对瑞利频移温度灵敏度的影响进行了对比总结, 得出各涂层参数对瑞利频移温度灵敏度的影响。

1 热应变理论

在 OFDR 系统中, 传感光纤特定位置的外界环境变化会导致光纤折射率分布或光纤长度的局部变化, 进而导致局部瑞利背向散射的频谱发生偏移。光纤布拉格光栅在外界环境变化时, 其光谱也会改变。这两种变化都可归结于折射率的变化^[16-17]。光纤中的瑞利散射是光纤本身折射率随机波动所引起的, 而光纤布拉格光栅是纤芯折射率周期性的变化。因此, 可将瑞利散射看作无数个不同周期布拉格光栅的叠加, 建模为具有随机周期分布的弱光纤布拉格光栅^[18]。因此, 在传感过程中, 光纤轴向应变 $\delta\varepsilon_a$ 、瑞利背向散射频移 $\delta\nu$ 、温度变化 δT 之间的关系可由布拉格光栅计算公式得^[19]

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_c} = -\frac{\delta\nu}{\nu_c} = K_T\delta T + K_\varepsilon\delta\varepsilon_a \quad (1)$$

式中, λ_c , ν_c , K_T , K_ε 分别是中心波长、中心频率、温度系数和应变系数。对于掺锗硅芯光纤, 温度系数 K_T 和应变系数 K_ε 的典型值分别为 $6.48 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $0.780 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ 。

令 $C_T = \lambda_c K_T$, $C_\varepsilon = \lambda_c K_\varepsilon$, 由式(1), 可以定义瑞利频移温度灵敏度为

$$\frac{\delta\lambda}{\delta T} = C_T + C_\varepsilon \frac{\delta\varepsilon_a}{\delta T} \quad (2)$$

当使用掺锗硅芯光纤, 中心波长 $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$ 时, λ_c , K_T , K_ε 已知, 可得 C_T 和 C_ε 分别为 $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $1.2 \text{ pm}/\mu\text{m}$ 。

对于只存在温度变化而没有拉伸或者压缩的涂层光纤, 其纤芯的轴向应变只取决于温度变化。为了模拟纤芯应变随温度变化的行为, 可以使用 Lamé 解。当具有 m 层涂层的光纤在温度变化为 δT 时, 每层径向、切向和轴向尺寸的微分应力 $[\delta\sigma_r^i, \delta\sigma_\theta^i, \delta\sigma_a^i]$ 和微分应变 $[\delta\varepsilon_r^i, \delta\varepsilon_\theta^i, \delta\varepsilon_a^i]$ 之间的关系可以用 Lamé 解^[12] 表示

$$\begin{bmatrix} \delta\sigma_r^i \\ \delta\sigma_\theta^i \\ \delta\sigma_a^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_i + 2\mu_i & \lambda_i & \lambda_i \\ \lambda_i & \lambda_i + 2\mu_i & \lambda_i \\ \lambda_i & \lambda_i & \lambda_i + 2\mu_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_r^i - \alpha_i\delta T \\ \delta\varepsilon_\theta^i - \alpha_i\delta T \\ \delta\varepsilon_a^i - \alpha_i\delta T \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\lambda_i = \frac{\eta_i E_i}{(1 + \eta_i)(1 - 2\eta_i)}, \quad \mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \eta_i)} \quad (4)$$

$$\delta\varepsilon_r^i = U_i + \frac{V_i}{r^2}, \quad \delta\varepsilon_\theta^i = U_i - \frac{V_i}{r^2}, \quad \delta\varepsilon_a^i = W_i \quad (5)$$

式中: i 表示层数; λ 和 μ 为 Lamé 参数; η , E 和 α 是每层的泊松比、杨氏模量和热膨胀系数; U , V 和 W 是由以下边界条件确定的常数:

$$\delta\sigma_r^i(r_i) = \delta\sigma_r^{i+1}(r_i) \quad (i = 0, 1, \dots, m-1) \quad (6)$$

$$\delta u_r^i(r_i) = \delta u_r^{i+1}(r_i) \quad (i = 0, 1, \dots, m-1) \quad (7)$$

$$\delta\sigma_r^m(r_m) = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^m \delta\sigma_a^i \cdot A_i = 0 \quad (9)$$

$$\delta\varepsilon_a^0 = \delta\varepsilon_a^1 = \dots = \delta\varepsilon_a^m = \delta\varepsilon_a \quad (10)$$

式中: r_i 和 A_i 是第 i 层的外径和横截面积; m 表示涂层总层数; $\delta\sigma_r^i(r)$ 和 $\delta u_r^i(r)$ 是第 i 层半径 r 处径向尺寸的微分应力和微分位移, 并且 $\delta u_r^i(r) = \int \delta\varepsilon_r^i \cdot dr$ 。由于光纤结构是轴对称的, 热负荷也是轴对称的, 很明显 $\delta\varepsilon_r^0 = \delta\varepsilon_\theta^0$, 所以可得 $V_0 = 0$ 。

通过式(3)~(10), 可以求得 $\delta\varepsilon_a/\delta T$ 与各层的半径、泊松比、杨氏模量和热膨胀系数的关系。由式(2)可进一步求得由各层的半径、泊松比、杨氏模量和热膨胀系数表示的瑞利频移温度灵敏度 $\delta\nu/\delta T$ 。

如图 1(a)、(b)所示, 对于典型的掺锗硅芯单模光纤, 由于其纤芯和包层的材料主要是石英玻璃, 它们的特性几乎相同。因此, 可将其视为“0”层。图中使用“光纤层”代指纤芯和包层。当只考虑轴向应变时, 可以对仅含 1 层涂层的光纤进一步简化分析。

首先, 假设外涂层和光纤之间完美结合, 当温度升高时, 光纤和 1 层外涂层分别受到应力 F_0 , F_1 的作用。在两个力作用下, 光纤的轴向应变为 $\delta\varepsilon_0$ 。在这种情况下, 光纤中的力 F_0 与 1 层外涂层的力 F_1 会达到一个平衡^[14]。即

$$F_0 = E_0 A_0 \delta\varepsilon_0 \quad (11)$$

$$F_1 = E_1 A_1 \delta\varepsilon_1 \quad (12)$$

$$F_0 = F_1 \quad (13)$$

F_0 , F_1 带来的应变关系由图 1(a)可得

$$\delta\varepsilon_a = \alpha_0\delta T + \delta\varepsilon_0 = \alpha_1\delta T - \delta\varepsilon_1 \quad (14)$$

由式(14)可得

$$\frac{\delta\varepsilon_a}{\delta T} = \left(\frac{E_1 A_1}{E_1 A_1 + E_0 A_0} (\alpha_1 - \alpha_0) + \alpha_0 \right) \quad (15)$$

进而可得瑞利频移温度灵敏度为

$$\frac{\delta\lambda}{\delta T} = C_T + C_\varepsilon \left(\frac{E_1 A_1}{E_1 A_1 + E_0 A_0} (\alpha_1 - \alpha_0) + \alpha_0 \right) \quad (16)$$

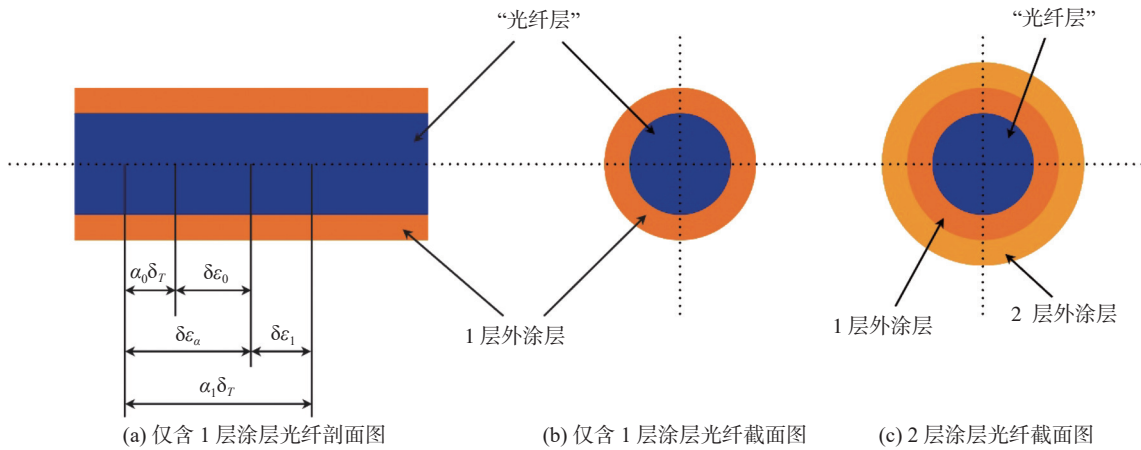


图 1 涂层光纤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coated fiber

由式(16)可以看出,瑞利频移温度灵敏度与外涂层的杨氏模量、半径以及热膨胀系数有关。对比Lame解,式(16)少了泊松比的影响,由此可以推测泊松比对瑞利频移温度灵敏度的影响较小,可以忽略。在仿真时也会对此进行验证,因为这可以看作是简化解成立的前提。

除了1层铝涂层光纤,本文对2层涂层光纤也进行了仿真分析,结构示意图见图1(c)。通常为了保护光纤,1层外涂层应为“软”材料(杨氏模量实际上小于10MPa),这一层会在纤芯和包层之后立即形成,而2层外涂层可以用多种材料和厚度独立形成。因此,与芯层、包层和1层外涂层相比,2层外涂层的材料性能和几何形状可以更方便、容易地进行改变^[20]。因此,本文对光纤的2层外涂层也进行了仿真。

2 仿真结果及讨论

为了得到1层外涂层不同参数对瑞利频移温度灵敏度 δ_λ/δ_T 的影响,假设光纤芯层和包层的参数为常数。单模光纤中这些参数的典型值为: $r_0 = 62.5 \mu\text{m}$, $E_0 = 72 \text{ GPa}$, $\alpha_0 = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\eta_0 = 0.17$ 。1层外涂层固定参数的设置,本文以铝涂层光纤为例, $r_1 = 85 \mu\text{m}$, $E_1 = 70 \text{ GPa}$, $\alpha_1 = 24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\eta_1 = 0.25$ 。当研究某一参数时,其他3个参数固定不变。结合瑞利频移温度

灵敏度定义式(2)、Lame解式(3)~(10)以及简化解式(11)~(16),利用MATLAB可得瑞利频移温度灵敏度(δ_λ/δ_T)与1层外涂层参数(η_1 , α_1 , E_1 , r_1)的关系如图2所示。

由图2(a)可以看出,泊松比对于瑞利频移温度灵敏度具有一定的增益,但是增益很小,可以忽略,这与由简化解推导出来的结论一致。由图2(b)可以看出,瑞利频移温度灵敏度随热膨胀系数线性增加。由图2(c)可以看出,当杨氏模量在0~200GPa之间时,瑞利频移温度灵敏度随杨氏模量快速增加;而在300GPa以后,瑞利频移温度灵敏度几乎不再随杨氏模量的增加而改变。由于1层外涂层的半径是光纤半径与涂层厚度之和,所以图2(d)中半径起始值为62.5 μm 。由图2(d)可以看出,涂层半径与杨氏模量对瑞利频移温度灵敏度的影响类似,当涂层半径在62.5~200 μm 时,瑞利频移温度灵敏度随涂层半径迅速增加;半径大于200 μm 时,瑞利频移温度灵敏度几乎不再随涂层半径的增加而改变。

当使用铝材料作为光纤涂层时,可进一步由式(2)得到瑞利频移与温度的关系如图3所示:

由图3可以看出,一旦材料确定,瑞利频移和温度成正比关系^[21],且Lame解与简化解的吻合度非常高。因此,在仅含1层涂层时,完全可以使用简化解代替Lame解来设计涂层光纤。

在研究2层外涂层对瑞利频移温度灵敏度影响时,同样假定1层外涂层各项参数为常数:

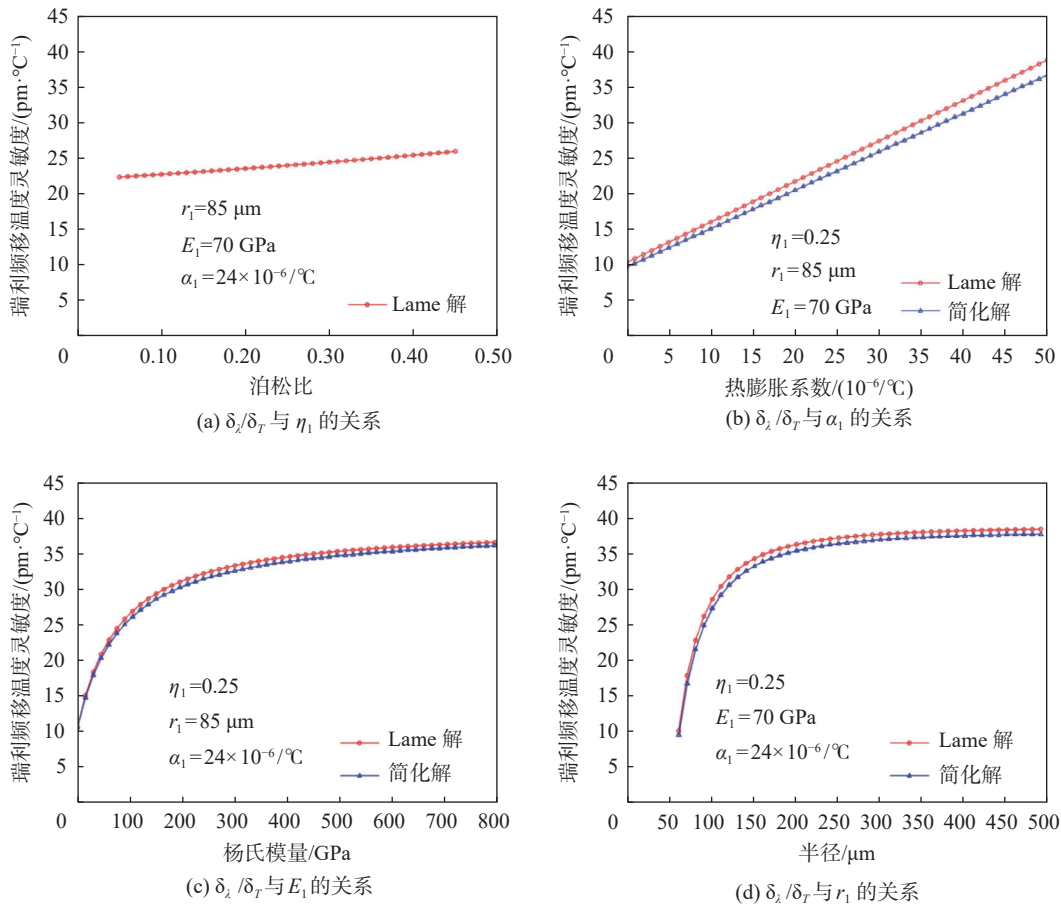


图 2 瑞利频移温度灵敏度 (δ_λ/δ_T) 与 1 层外涂层参数 ($\eta_1, \alpha_1, E_1, r_1$) 的关系

Fig. 2 Relationship between temperature sensitivity of Rayleigh frequency shift (δ_λ/δ_T) and the external first coating parameters ($\eta_1, \alpha_1, E_1, r_1$)

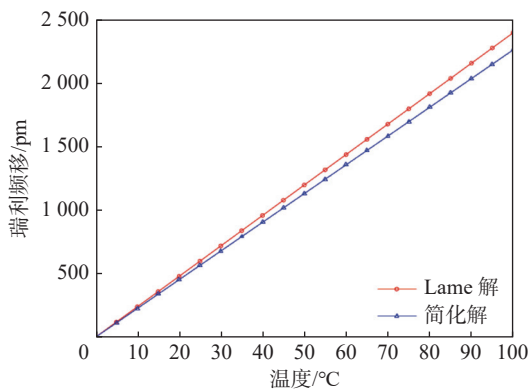


图 3 光纤瑞利频移随温度变化趋势

Fig. 3 Rayleigh frequency shift of optical fiber varies with temperature

$r_1 = 100 \mu\text{m}$, $E_1 = 0.007 \text{ GPa}$, $\alpha_1 = 150 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\eta_1 = 0.4995$ 。假定 2 层外涂层各项参数为: $r_2 = 1000 \mu\text{m}$, $E_2 = 5 \text{ GPa}$, $\alpha_2 = 150 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,

$\eta_2 = 0.44$ 。“光纤层”的参数与仅含 1 层涂层的光纤相同。利用 Lamé 解在 MATLAB 中可以得到瑞利频移温度灵敏度 (δ_λ/δ_T) 与 2 层外涂层各项参数 ($\eta_2, \alpha_2, E_2, r_2$) 的关系。

对比图 2 和图 4 可以看出, 2 层外涂层和 1 层外涂层的各项参数对瑞利频移温度灵敏度影响具有相同的趋势。因此可知, 无论 1 层还是 2 层, 外涂层泊松比对瑞利频移温度灵敏度几乎没有影响, 可以忽略。而瑞利频移温度灵敏度会随着热膨胀系数的增加而线性增加。在一定范围内, 瑞利频移温度灵敏度也会随着涂层半径和杨氏模量的增加而增加。但是, 一旦达到它们各自的某一阈值, 灵敏度便不再随涂层半径和杨氏模量的改变而改变。

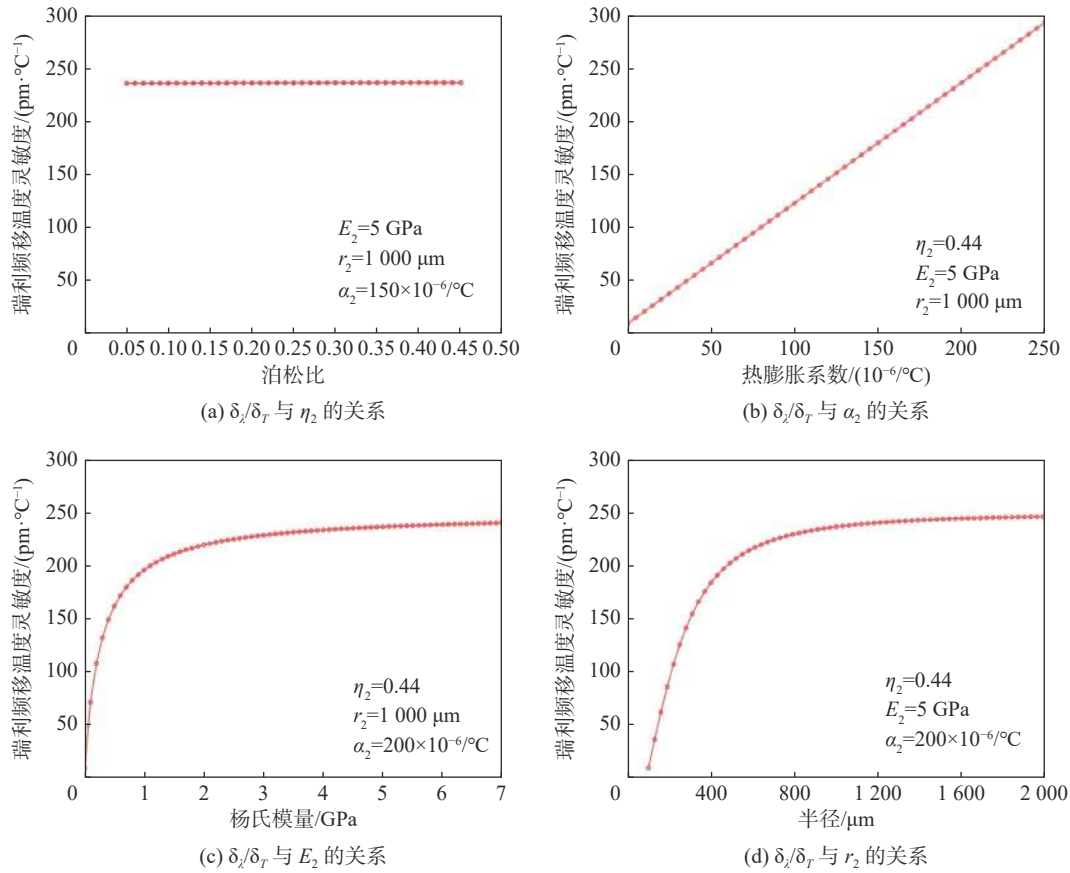


图 4 瑞利频移温度灵敏度 (δ_λ/δ_T) 与 2 层外涂层参数 (η_2 , α_2 , E_2 , r_2) 的关系

Fig. 4 Relationship between temperature sensitivity of Rayleigh frequency shift (δ_λ/δ_T) and the external second coating parameters (η_2 , α_2 , E_2 , r_2)

3 结 论

本文仿真研究了不同涂层光纤对于 OFDR 瑞利频移温度灵敏度的影响。结果表明当内层参数固定时，瑞利频移温度灵敏度会随着光纤最外层涂层参数的改变而改变。而在一些需要高温灵敏度以及低温场景下，OFDR 温度传感器由于自身的温度灵敏度以及传感温度效应的变化难以胜任。通过对外层参数的控制，可以达到预期的瑞利频移温度灵敏度。这对于设计用于 OFDR 高灵敏度温度传感的光纤具有重要意义。但是，制造工艺和材料的热不稳定性等因素可能会导致计算出来的瑞利频移温度灵敏度和实际值存在偏差。因此，在实际应用中需要对此加以考虑。综上所述，选择合适的涂层能够提高 OFDR 的温度灵敏度，增加 OFDR 应用场景。

参 考 文 献:

- [1] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601 – 8639.
- [2] LIANG C S, BAI Q, YAN M, et al. A comprehensive study of optical frequency domain reflectometry[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 41647 – 41668.
- [3] 崔楠楠. 高空间分辨率的光频域反射关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 4.
- [4] YANG Y J, XIANG Y, BU A M, et al. Liquid-phase deposition of Al_2O_3 coating on quartz fiber for enhanced strength at elevated temperature[J]. *Composite Interfaces*, 2022, 29(5): 487 – 501.
- [5] LI P F, FU C L, ZHONG H J, et al. A nondestructive measurement method of optical fiber young's modulus based on OFDR[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1450.
- [6] ZHANG M, LIU Z H, MA Y W, et al. Gelatin-coated long period fiber grating humidity sensor with

- temperature compensation[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(2): 027104.
- [7] WANG Z, CHEN D L, YANG X C, et al. Temperature sensor of single-mode-no-core-single-mode fiber structure coated with PDMS[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102793.
- [8] SERAJI F E, TOUTIAN G. Effect of temperature rise and hydrostatic pressure on microbending loss and refractive index change in double-coated optical fiber[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2006, 30(6): 317 – 331.
- [9] WANG X Y, SUN X Y, HU Y W, et al. Highly-sensitive fiber Bragg grating temperature sensors with metallic coatings[J]. *Optik*, 2022, 262: 169337.
- [10] HABISREUTHER T, HAILEMICHAEL E, ECKE W, et al. ORMOCER coated fiber-optic Bragg grating sensors at cryogenic temperatures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 13 – 16.
- [11] LIU Y Q, GUO Z Y, ZHANG Y, et al. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(6): 564 – 566.
- [12] GU H D, DONG H J, ZHANG G Y, et al. Effects of polymer coatings on temperature sensitivity of Brillouin frequency shift within double-coated fibers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(2): 864 – 869.
- [13] LU X, SOTO M A, THÉVENAZ L. Impact of the fiber coating on the temperature response of distributed optical fiber sensors at cryogenic ranges[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 961 – 967.
- [14] KWON Y S, NAEEM K, JEON M Y, et al. Enhanced sensitivity of distributed-temperature sensor with Al-coated fiber based on OFDR[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 229 – 234.
- [15] 赵梦梦. 基于光频域反射技术的分布式光纤传感器研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2020: 14.
- [16] FROGGATT M, MOORE J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735 – 1740.
- [17] TUR M, SOVRAN I, BERGMAN A, et al. Structural health monitoring of composite-based UAVs using simultaneous fiber-optic interrogation by static Rayleigh-based distributed sensing and dynamic fiber Bragg grating point sensors[C]//Proceedings of SPIE 9634, 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. Curitiba, Brazil: SPIE, 2015: 96340P.
- [18] 张洪艺. 基于 OFDR 的分布式光纤应变传感系统设计与数据解调关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 9.
- [19] KREGER S T, GIFFORD D K, FROGGATT M E, et al. High resolution distributed strain or temperature measurements in single-and multi-mode fiber using swept-wavelength interferometry[C]//Proceedings of Optical Fiber Sensors 2006. Cancun Mexico: Optica Publishing Group, 2006: ThE42.
- [20] BOUTEN P C P, BROER D J, JOCHEM C M G, et al. Optical fiber coatings: high modulus coatings for fibers with a low microbending sensitivity[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1989, 29(17): 1172 – 1176.
- [21] MA G M, ZHOU H Y, LI Y B, et al. High-resolution temperature distribution measurement of GIL spacer based on OFDR and ultraweak FBGs[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(6): 3866 – 3873.

(编辑: 李晓莉)