

特殊 LPFG 温度传感器的灵敏度特性研究

廖凌云

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210000)

摘要:普通长周期光纤光栅(LPFG)温度传感器的灵敏度较低,在一些需要对温度进行精确测量的领域中,该传感器的使用受到限制。为了解决这一问题,从理论上分析了 LPFG 温度传感器的灵敏度影响因素,并且依据理论分析,选取特殊的聚合物聚氯乙烯(PVC)和环氧树脂作为纤芯材料来进行灵敏度研究。仿真研究发现,与普通 LPFG 温度传感器相比,在一定的温度范围内,使用环氧树脂作为纤芯材料的光纤光栅温度传感器具有较大的温度灵敏度,在 25℃~30℃之间温度灵敏度可以达到 37.8nm/℃,相当于普通纤芯 LPFG 温度传感器的 16 倍。该结论表明,使用环氧树脂作为纤芯材料可以提高 LPFG 温度传感器的灵敏度,进一步拓展光纤光栅传感器的应用范围。

关键词:长周期光纤光栅;谐振波长;热光效应;热光系数

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2018)01-0028-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.01.008

Research on sensitivity characteristics of special LPFG temperature sensor

LIAO Lingyun

(School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210000, China)

Abstract: The sensitivity of the conventional LPFG temperature sensor is low, which makes the use of LPFG temperature sensor limited in some areas requiring accurate temperature measurement. In order to solve this problem, this paper analyzes the sensitivity factors of LPFG temperature sensor theoretically, based on the theoretical analysis, the special polymer polyvinyl chloride (PVC) and epoxy resin are selected as core materials for sensitivity study. The simulation study shows that compared with the ordinary LPFG temperature sensor, in a certain temperature range, using epoxy resin as the core material of the optical fiber grating temperature sensor with greater temperature sensitivity, temperature sensitivity can reach 37.8nm/℃ at 25℃~30℃, equivalent to 16 times the common core LPFG fiber grating. This conclusion shows that using epoxy resin as core material can improve the sensitivity of LPFG temperature sensor, and further expand the application range of fiber grating sensor.

Key words: LPFG; resonant wavelength; thermo-optic effect; thermo-optic coefficient

0 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是一种纤芯折射率沿轴向存在周期性调制的光栅结构,光栅周期一般为 100~1000μm。LPFG 与普通光纤光栅和光纤布喇格光

栅(FBG)相比具有许多优点:LPFG 没有背向反射光谱,不会影响光源的稳定性;LPFG 的光谱带宽较宽,其前向传播的纤芯导模与包层模之间会发生模式耦合。因为 LPFG 具有易与光纤耦合、插入损耗低、结构简单和体积小等优点,所以日益受到人们的关注^[1]。

但是,普通 LPFG 温度传感器的灵敏度较低,使其在一些需要精确测温领域的使用受到了限制^[2]。因此,

收稿日期:2017-09-02。

作者简介:廖凌云(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信与光电子器件。

为了增加 LPFG 温度传感器的灵敏度, 本文使用特殊聚合物材料作为 LPFG 的纤芯材料, 并对该 LPFG 温度传感器的灵敏度特性进行研究。

1 理论分析

LPFG 是纤芯折射率周期性调制变化的光栅, 这种调制可以通过改变纤芯折射率或引入光纤的物理形变来获得。根据偶合模理论^[3], 前向传输的纤芯基模和包层模的耦合系数中存在积分项, 该积分项为:

$$\int_0^{2\pi} d\phi \exp[i(l-1)\phi] = 2\pi\sigma_l \quad (1)$$

其中, σ_l 为 Kronecher 函数, l 为包层模的阶数, 只有当 $l=1$ 时, 式(1)的值为 1, 在其它情况下的值为 0, 即纤芯导模只与一阶包层模产生耦合。 i 表示虚数单位, ϕ 表示相位, d 为微分算符。通过相位匹配条件^[3]得出:

$$\lambda_m = [n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda)]\Lambda, m=1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

其中, λ_m 表示纤芯基模与包层模 $\text{LP}_{0m}(m=1, 2, 3, 4, \dots)$ 发生耦合时一阶 m 次谐振波的中心波长, 简称谐振波长。 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda)$ 表示纤芯导模的有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda)$ 表示一阶 m 次包层模在波长 λ 处的有效折射率, 纤芯导模和包层模的有效折射率都是包层的函数, Λ 表示光栅周期。

由热光效应^[4]可知, LPFG 的周期 Λ 是一个与温度有关的量, 并且 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda)$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda)$ 也与温度有关, 因此谐振波长 λ 也是温度的函数, 我们可以通过谐振波长 λ 的变化来表征环境温度。式(2)右边各项求偏微分可以得出温度灵敏度, 其表达式如下^[5]:

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{d\lambda_m}{d\delta_{\text{eff}}} \left[\frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda)}{dT} - \frac{n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda)}{dT} \right] + \Lambda \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (3)$$

其中, δ_{eff} 表示纤芯与包层的有效折射率差, L 表示光纤光栅的长度。式(3)中等式右边的第一项表示热光效应, $\frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda)}{dT}$ 和 $\frac{n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda)}{dT}$ 分别表示纤芯和包层的热光系数。从式(3)可以看出, 通过设计合理的热光系数制作的 LPFG 可以提高传感器的灵敏度。

本研究中纤芯所用的聚合物材料聚氯乙烯(PVC)和环氧树脂的热光系数都为负数, 而包层是普通的热光系数为正数的硅。因此, 纤芯与包层的热光系数符号相反。由式(3)可以看出这一巨大的反差能让热光效应得到很大增强, 导致光谱向光波的负半轴方向移动。

2 LPFG 温度传感器的设计和仿真

本文使用的光学仿真软件为 OptiGrating, 仿真所用的 LPFG 温度传感器的各项参数设置如下: 纤芯直径为 $8\mu\text{m}$, 纤芯使用 PVC 和环氧树脂时的纤芯折射率都为 1.46, 包层直径为 $60.5\mu\text{m}$, 包层折射率为 1.45, 包层外的空气层直径为 $80\mu\text{m}$, 折射率为 1, 光栅周期为 $162.4993\mu\text{m}$, 光栅长度为 $50000\mu\text{m}$, 切趾系数为 0.8, 光栅段数为 51, 折射率调制深度为 0.00025, 中心波长为 $1.55\mu\text{m}$ 。

纤芯材料 PVC 和环氧树脂的热光系数分别为 -0.42×10^{-4} 和 -1.5×10^{-4} ^[6], 包层材料使用热光系数为 8.3×10^{-6} 的硅。在 LPFG 的谐振波长处, 纤芯基模与一阶包层模 LP_{06} 发生耦合, 谐振波长处有最大的透射峰。根据温度改变折射率这一特性, 又由于热光系数为 dn/dT , 我们可知改变温度也可以改变热光效应, 从而使谐振波长发生偏移。

当纤芯材料为 PVC, 温度从 25°C 变化到 30°C 时, 仿真结果如图 1 所示。可以看出, 当光栅纤芯使用 PVC 时, 温度从 25°C 上升到 30°C 的过程中, 谐振波长朝着短波长方向移动。这一现象可以被式(3)很好地解释, 由于纤芯折射率为负数导致式(3)右边第一项变为负数, 而该项是热光效应的主要影响因子。因此, 谐振波长向短波长方向的移动, 这与前文理论分析的结果是相吻合的。另外, 在温度变化过程中, 波长变化了 $0.049\mu\text{m}$ 。由式(3)可以计算出光纤光栅传感器的灵敏度大约为 $9.8\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。

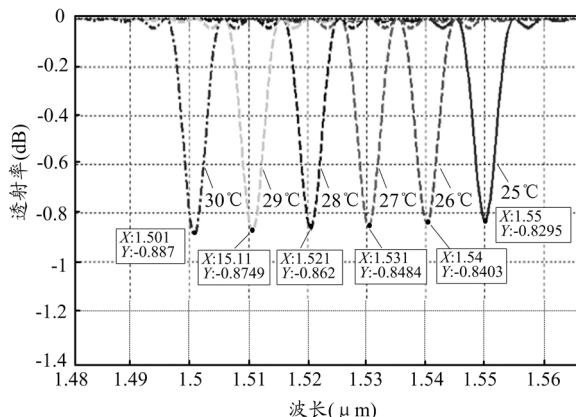


图 1 纤芯为 PVC 时, LPFG 谐振波长随着温度变化的变化情况

当我们使用环氧树脂为纤芯材料时, 仿真结果如图 2 所示。在整个温度变化过程中, 谐振波长变化了 $0.189\mu\text{m}$ 。通过式(3)可以计算出此时 LPFG 温度传感器的灵敏度大约为 $37.8\text{nm}/^\circ\text{C}$, 与 PVC 纤芯的 LPFG 温度传感器相比, 其灵敏度有所增加。

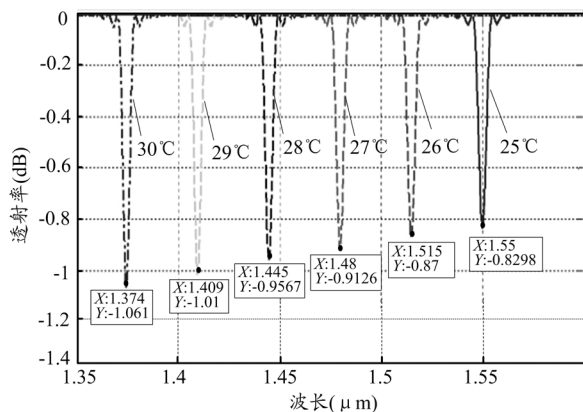


图2 纤芯为环氧树脂时,LPFG 谐振波长随温度变化的变化情况

最后,我们使用普通的硅作为纤芯材料,得到的仿真结果图如图3所示。可以看出,当温度从25℃变化到30℃时,谐振波长向长波长方向移动,但在整个温度变化过程中谐振波长的偏移量仅为0.01μm,计算可知其灵敏度大约为2nm/℃。

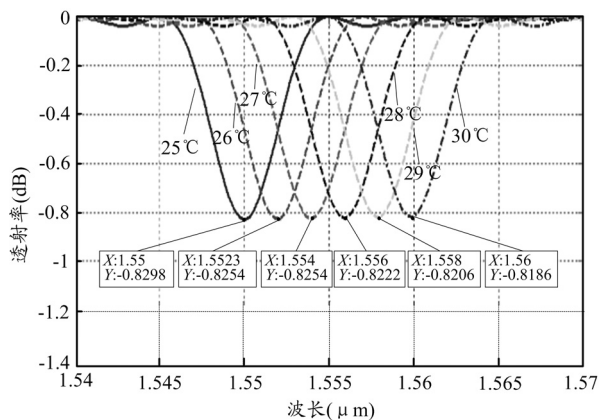


图3 普通纤芯的 LPFG 的温度传感器的谐振波长随温度的变化

由以上仿真结果我们可以知道,使用环氧树脂作为纤芯的 LPFG 温度传感器灵敏度最高,可以达到37.8nm/℃,这一结论使得 LPFG 温度传感器在温度精确测量领域的使用有了新的可能。

3 结束语

本文通过对 LPFG 耦合模式进行理论分析,得出热光效应与 LPFG 温度传感器谐振波长之间的关系。我们分别选取 PVC 和环氧树脂作为纤芯材料来提高热光效应,并利用 OptiGrating 仿真软件分析了纤芯材料的热光系数与 LPFG 温度传感器灵敏度之间的关系。仿真结果表明,选取具有合理热光系数的纤芯材料可以很大地提高 LPFG 温度传感器的灵敏度,并且在25℃~30℃之间温度灵敏度可以达到37.8nm/℃,相当于普通纤芯 LPFG 的16倍。利用这一特点,可以使 LPFG 温度传感器在高精度测量方面有很好的应用,而且由于 LPFG 在传感器方向的许多优势,使得高灵敏度 LPFG 温度传感器能广泛运用到各行各业中。

参考文献:

- [1] ZHAN Y, WU H, YANG Q Y, et al. Fiber grating sensors for high-temperature measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(4): 349-354.
- [2] ENUGOPALAN T V, YEO T L, SUN T, et al. High sensitivity long-period grating-based temperature monitoring using a wide wavelength range to 2.2μm[J]. Optics Communications, 2006, 268(1): 42-45.
- [3] SHU X, ZHANG L, BENNION I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- [4] NG M N, CHIANG K S. Thermal effects on the transmission spectra of long-period fiber gratings[J]. Optics Communications, 2002, 208(4): 321-327.
- [5] HIDEKI FUKANO, DAICHI WATANABE, SHUJI TAUE. Sensitivity characteristics of multimode-interference optical-fiber temperature sensor with solid cladding material [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(24): 8921-8927.
- [6] JAMES S W, TATAM R P. Optical fibre long-period gratings: characteristics and applications [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(5): R49-R61.

敬告作者

为广泛构架起作者和读者之间的桥梁,本刊加入了 CNKI 中国期刊全文数据库等数据期刊网,即每期刊物出版后,我们将把同样的数据送至上述数据库或网站,使信息能以最快的速度国际化、网络化。其中稿费已包含于本刊一次性所付作者的稿费中。

为尊重作者的著作权,如果有作者不同意将出版后的文章进入上述数据库或网站,来稿时敬请注明,否则将视为同意,谢谢合作。

《光通信技术》编辑部