

# 液体环境中微纳光纤布拉格光栅的温度特性

刘颖刚<sup>1</sup>, 张伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065;

<sup>2</sup>西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055

**摘要** 针对微纳光纤布拉格光栅(MNFBG)在应用中存在的温度依赖问题,数值模拟了被不同折射率液体包围的MNFBG的反射波长与温度的关系,并且制作了可更换封装液体的MNFBG用于实验研究。通过使用蒸馏水和不同折射率的匹配液封装MNFBG,得到了MNFBG反射光谱及其中心波长随封装液体温度的变化规律。研究发现,在相同的温度变化过程中,不同性质的封装液体会影响MNFBG反射光谱的形状和移动方向,改变了普通光纤布拉格光栅(FBG)在温度升高过程中反射光谱形状几乎不变但其中心波长线性红移的特性。封装液体的折射率和热光系数越大,MNFBG反射波长随温度的变化越趋于非线性。换用折射率和热光系数分别为1.456和 $4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的匹配液体后,MNFBG反射波长的温度灵敏度为 $-50.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。MNFBG特性与环境液体、温度和FBG的尺寸有关,通过有效控制相关因素可以实现FBG在更多领域的功能化应用。

**关键词** 光纤光学;微纳光纤布拉格光栅;热光效应;温度灵敏度;液体折射率

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.040605

## Temperature Characteristics of Micro-Nanofiber Bragg Grating Surrounded with Liquids

Liu Yinggang<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Photoelectricity Gas-Oil Logging and Detecting, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

<sup>2</sup>School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

**Abstract** In order to investigate the temperature dependence of micro-nanofiber Bragg grating (MNFBG) in application, we simulate the relationship between reflection wavelength and temperature of MNFBG which is surrounded with liquids with different refractive indexes, and MNFBGs surrounded with replaceable encapsulating liquids are fabricated and used in experiments. In experiments, the variations in reflection spectral and its center wavelength with temperature of encapsulating liquids can be obtained when we encapsulate the MNFBG with distilled water and matching liquids with different reflective indexes. Research results show that the shape and the moving direction of reflection spectra can be effected by the encapsulating liquids with different properties in the same temperature changing process, which is different from the ordinary fiber Bragg grating (FBG). The reflection spectral shape of the ordinary FBG almost does not change when temperature is increasing, but its center wavelength increases with the temperature increasing linearly. The larger the refractive index and the thermo-optic coefficient of the encapsulating liquids are, the more nonlinearity the spectral wavelength shifting with temperature changing is. When the MNFBG is surrounded with the liquid with the refractive index of 1.456 and the thermo-optic coefficient of  $4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , the temperature sensitivity of the reflection wavelength can reach up to  $-50.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ . These spectral characteristics of MNFBG are connected with the surround liquid, the temperature and the size of

收稿日期: 2016-11-16; 收到修改稿日期: 2016-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(61240028)、陕西省自然科学基金(2013JM8032)、陕西省教育厅科研计划(14JK1423)、国家级大学生创新创业训练计划(201610705020)

作者简介: 刘颖刚(1977—),男,硕士,副教授,主要从事光纤传感技术与应用方面的研究。

E-mail: ygliu@xysu.edu.cn

FBG. Through effectively controlling these correlative factors, more functional applications of FBG will be realized in different fields.

**Key words** fiber optics; micro-nanofiber Bragg grating; thermo-optic effect; temperature sensitivity; liquid refractive index

**OCIS codes** 060.2310; 060.3735; 060.2370

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)具有窄线宽和较好的波长选择特性,在光通信和传感领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>,成为新一代光纤传感技术的核心器件之一。普通的单模FBG由于具有较厚的二氧化硅包层,纤芯的传输光场不会与外界环境相互作用,因此纤芯的传输特性不会受到环境物质的影响。但当去除部分甚至整个包层以后,单模FBG就会成为微纳光纤布拉格光栅(MNFBG),它是一种直径在微米或纳米量级的新型光纤波导器件<sup>[4-6]</sup>,纤芯的传输光场会与环境物质相互作用,当环境物质的折射率和温度改变时,传输光场的传输特性就会受到一定影响<sup>[7-9]</sup>,从而使布拉格反射波长和反射光谱的强度发生改变。基于FBG的液体折射率传感器就是利用该光学特性进行折射率的传感、检测以及折射率与温度的区分测量<sup>[10-12]</sup>。

将MNFBG应用于不同物质环境下折射率的测量已经成为了国内外光纤传感领域的研究热点。然而,在诸多文献中,通常假定测量过程中的温度保持不变,或者假定薄包层FBG对环境温度的变化不敏感而忽略温度的影响,即便有研究人员在测量中考虑了温度的影响,也是将处在液体环境中的MNFBG的布拉格反射波长随温度变化的灵敏度或温度系数按照恒定量来处理,并且未能合理地解释MNFBG处在液体环境中的温度灵敏度或温度系数低于普通FBG的原因,也未讨论MNFBG反射波长对环境液体热光效应的依赖性。本文在考虑光纤本身热效应的基础上,进一步考虑了环境液体的热光效应,通过理论与实验研究了环境液体热光效应对反射波长漂移的影响,分析了薄包层MNFBG在液体环境中的温度特性,解释了液体环境中光栅温度系数减小的原因,并且获得了液体环境中MNFBG温度特性的变化规律。相关研究结论可对基于FBG的液体折射率传感、温度补偿以及热光功能开关的研究提供一定参考。

## 2 基本原理与理论分析

### 2.1 基本原理

FBG是一种光纤芯区折射率受周期性调制的光纤波导,其导模中心波长 $\lambda$ 、纤芯导模有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 和光栅周期 $\Lambda$ 之间满足 $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 。光栅周期和纤芯导模有效折射率的改变均可引起导模中心波长的改变,FBG对温度、应变和压力等的传感正是基于此原理实现的。普通的FBG无法应用于折射率传感,因为其较厚的二氧化硅包层将导模光场约束在纤芯内部,无法与外界物质相互作用,所以谐振波长对外界环境折射率的变化不敏感。但当去除包层甚至部分纤芯时,纤芯内的部分传输光会以倏逝场的形式与环境介质相互作用。当环境折射率发生变化时,纤芯传输模的有效折射率发生相应的变化,进而使FBG的反射波长发生变化,再根据反射波长与环境折射率的变化关系实现对环境折射率的测量。已有研究表明,芯径尺寸越小,环境介质中的倏逝场越强,大比例倏逝场与环境物质的相互作用更容易受到环境折射率变化的影响,导致纤芯导模有效折射率发生明显变化,从而使得反射波长具有更高的折射率灵敏度<sup>[4,6]</sup>。

温度变化引起的FBG反射波长随温度的漂移量可表示为

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda + 2\Lambda \cdot \Delta n_{\text{eff}}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\Lambda$ 为光栅周期的变化量, $n_{\text{eff}}$ 为纤芯导模有效折射率, $\Delta n_{\text{eff}}$ 为纤芯导模有效折射率的变化。考虑到光纤本身的热膨胀效应以及相应内应力产生的弹光效应、芯径变化产生的波导效应和环境液体的热光效应<sup>[13]</sup>, (1)式可转化为

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \left[ a + \xi - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) a + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial r} a \right] \Delta T + \Delta T \lambda_0 \zeta_n \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n}, \quad (2)$$

式中 $a$ 、 $\xi$ 和 $\zeta_n$ 分别为FBG的热膨胀系数、热光系数和环境液体的热光系数, $p_{ij}$ 为光纤材料的弹光系数( $i=1,2;j=1,2$ ), $n$ 为环境液体的折射率, $r$ 为光栅的外半径, $\lambda_0$ 为光纤光栅的初始中心波长, $\Delta T$ 为环境温度的变化量。(1)式右边第一项为FBG对环境液体折射率变化不敏感条件下的温度响应,该项代表了普通

FBG 的温度特性。光纤材料的热膨胀效应、热光效应、弹光效应以及热膨胀导致的波导效应的共同作用,使得光栅的反射波长随温度的升高发生线性红移;第二项代表的是环境液体热光效应导致的反射波长的移动,由于环境液体的热光系数本身为负值(即温度升高,液体的折射率减小),纤芯导模有效折射率随环境折射率的增大而增大<sup>[4]</sup>,意味着温度升高,反射波长将发生紫移,若求得有效折射率及其随光纤半径和环境折射率的变化函数,即可定量求得反射波长紫移的漂移量。综合考虑多重效应的作用结果,对于被液体包围的 MNFBG,在环境液体温度改变的过程中,其对应反射波长的漂移特性决定于起主要作用的物理效应。随着 FBG 二氧化硅包层厚度的减小,其对环境折射率变化的敏感度增大,导致越细的 MNFBG 对热光系数越大的液体的温度变化越敏感,即通过减小 MNFBG 的芯径尺寸和增加环境液体的折射率和热光系数,可以增强液体热光效应对 MNFBG 的影响。根据求解光纤线偏振(LP)模式特征方程<sup>[14]</sup>获得的纤芯导模有效折射率的变化规律,可对上述特性进行数值模拟。

## 2.2 理论模拟与分析

利用 OptiGrating 软件对处在液体环境中的 MNFBG 的温度特性进行模拟与分析。模拟中,光纤选用双层结构(即纤芯和二氧化硅包层),纤芯和二氧化硅包层对应的折射率分别为 1.468 和 1.463,纤芯半径和二氧化硅包层厚度分别为  $4.2 \mu\text{m}$  和  $0.1 \mu\text{m}$ 。光纤的热膨胀系数  $\alpha \approx 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,热光系数  $\xi \approx 6.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,弹光系数  $P_{11} = 0.113, P_{12} = 0.252$ ,FBG 的周期为  $535.5 \text{ nm}$ ,光栅栅区的长度为  $10 \text{ mm}$ 。蒸馏水和两种匹配液在  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  下的折射率分别为 1.333, 1.380, 1.456;它们对应的热光系数分别为  $-1 \times 10^{-4}, -4 \times 10^{-4}, -4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

图 1 为模拟得到的纤芯直径为  $8.6 \mu\text{m}$  的 MNFBG 在蒸馏水和两种匹配液中的反射波长随环境温度的变化曲线。对于用蒸馏水和  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  下折射率为 1.380 的匹配液封装的两种 MNFBG 而言,反射波长随温度的升高基本呈线性增加,数值拟合后两种 MNFBG 对应的反射波长的温度灵敏度分别为  $10.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $8.0 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。当液体更换为  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  下折射率为 1.456 的匹配液以后,MNFBG 的反射波长随温度变化而漂移的特性发生了明显改变,即随着环境液体温度升高,MNFBG 反射波长的移动方向向短波方向发生非线性漂移,反射波长的漂移对应的温度灵敏度随温度的升高而降低,在测量温度范围内的平均温度灵敏度达到了  $-10.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

通过上面的对比发现,当普通 FBG 的包层变薄成为 MNFBG 时,随着环境液体折射率和热光系数的增大,环境液体热光效应对 MNFBG 反射波长温度特性的影响更加明显。出现这种现象的原因为:环境温度升高时,纤芯的热膨胀效应、热光效应、弹光效应以及热膨胀产生的波导效应会引起光栅周期和有效折射率增加,从而导致光栅的反射波长随温度的升高呈线性红移,但这还不足以抵消反射波长随温度的升高而呈非线性紫移的特性,综合作用的结果是 MNFBG 的反射波长不仅随温度的升高而减小,而且其非线性变化效应更强。

已有研究表明,随着光栅芯径尺寸的减小和环境液体折射率的增大,MNFBG 的反射波长对环境折射率的变化更加敏感<sup>[15-17]</sup>,所以对于具有较大折射率和热光系数的液体而言,同样的温度变化会导致较大的折射率变化量,进而引起明显的反射波长漂移。尺寸越小的 MNFBG,其反射波长的这种移动特性就越明显,反射波长随温度变化的线性度变得越差。特别是对于在  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  下折射率为 1.456 的液体而言,其折射率与纤芯导模有效折射率非常接近,此时纤芯导模有效折射率随环境折射率变化的灵敏度较高,导致 MNFBG 的反射波长对环境折射率的变化具有较高的灵敏度,从而使温度升高引起的反射波长的变化更加明显。当温度升高到一定程度时,环境液体折射率与纤芯导模有效折射率的差异增大,导致 MNFBG 反射波长对环境折射率变化的灵敏度降低,即随温度的进一步升高,反射波长的变化趋于平缓。当二氧化硅包层被完全去除,进一步减小 MNFBG 的芯径尺寸后,环境温度越低,液体的折射率越大,MNFBG 对折射率变化的灵敏度也就越高,这种效应也将得到增强。图 2 给出了纤芯直径分别为  $6.0 \mu\text{m}$  和  $3.0 \mu\text{m}$  的无二氧化硅包层的 MNFBG 反射波长随温度的变化曲线,模拟中环境液体的热光系数依然取  $-4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,设定环境液体在  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  时的折射率为 1.456。从中不难发现,在温度升高过程中,两种尺寸的 MNFBG 的反射波长在低温区域的变化均较大,但在较高温度区域的变化则趋于平缓;减小芯径尺寸后,MNFBG 的反射波长随温度变化的这种特性变得更加明显,完全符合理论分析的结论。因此,环境液体的性质及其热光效应的强弱对 MNFBG 反射波长的变化起到了决定性作用。

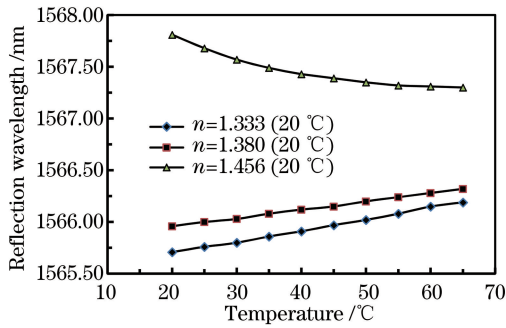


图 1 不同液体环境中 MNFBG 反射波长随温度的变化(纤芯直径为  $8.6 \mu\text{m}$ )

Fig. 1 Variation in reflection wavelength with temperature when MNFBG is surround with different liquids (core diameter is  $8.6 \mu\text{m}$ )

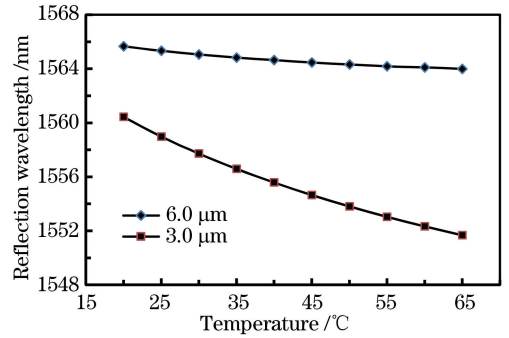


图 2 相同液体环境下纤芯直径为  $6.0 \mu\text{m}$  和  $3.0 \mu\text{m}$  的 MNFBG 反射波长随温度的变化

Fig. 2 Variation in reflection wavelength with temperature of MNFBGs with core diameter of  $6.0 \mu\text{m}$  and  $3.0 \mu\text{m}$  surround with same liquid

### 3 实验研究与结果分析

#### 3.1 实验装置

在恒温条件下,用自配的浓度为 16% 的氢氟酸溶液腐蚀普通商用 FBG,根据剩余直径随时间的线性变化关系<sup>[11]</sup>控制腐蚀时间,从而获得 MNFBG。图 3 中 MNFBG 最终的直径是在显微镜下测得的,其最细部分的纤芯直径约为  $8.6 \mu\text{m}$ 。在腐蚀 FBG 之前,先用长度为 50 mm、外径为 3 mm、壁厚为 0.5 mm 的有机玻璃管对 FBG 进行了封装,两端用热熔胶密封。腐蚀的时候,先利用医用注射器注入腐蚀液,然后将整个装置浸入  $19 \text{ }^\circ\text{C}$  的水浴锅中,并开始计时。经过大约 260 min 的腐蚀后,发现光栅的反射波长紫移明显,同时出现带宽展宽现象,此时立即取出装置,并用注射器吸出腐蚀液,再通过多次注入、吸出蒸馏水来对有机玻璃管进行清洗。待清洗干净后,用注射器注入待测液体,并用热熔胶再次密封有机玻璃管的两端。完成实验后,将 FBG 从有机玻璃管中取出,放在显微镜下测量 MNFBG 的直径。

腐蚀过程中 FBG 的监测和温度特性的测定均在图 3 所示的实验系统中完成,其中封装好的 MNFBG 放置在温度可调控的水浴锅中,光纤放大自发辐射(ASE)光源发出的光经光纤环形器(OFC)进入光栅后,满足布拉格反射波长条件的光将被反射回 OFC,不过由于 OFC 对传输光方向的限制,反射光将从 OFC 的另一端口进入光谱分析仪(OSA),从而实现反射光谱的监控。受有机玻璃管的影响,有机玻璃管内液体温度的变化相对于有机玻璃管外液体温度的变化是有些滞后的。因此,每次改变水域温度到某一温度值时,基本上是等到反射波长和功率稳定后才记录数据。

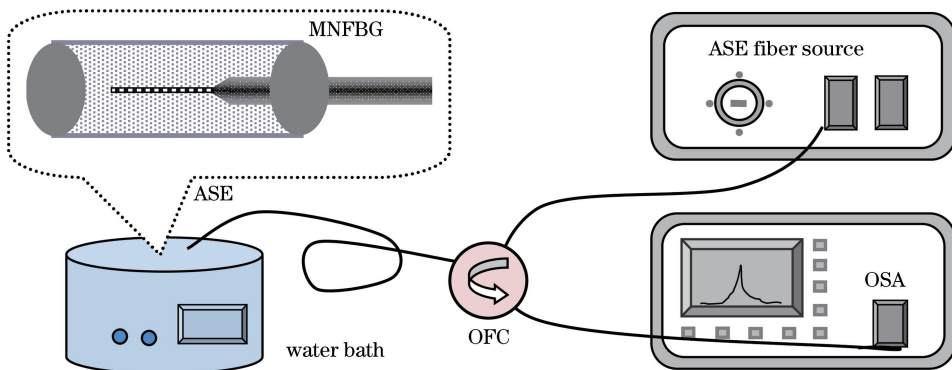


图 3 MNFBG 液体折射率传感测量实验系统

Fig. 3 Experimental system of MNFBG liquid refractive index sensing measurement

#### 3.2 结果与分析

实验中,研究了所制作的纤芯直径为  $8.6 \mu\text{m}$  的 MNFBG 在蒸馏水( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时折射率为 1.333)和两种匹配

液(20 °C时折射率分别为 1.380 和 1.456)中的反射光谱随温度的变化特性。当液体为蒸馏水时,加温过程中 MNFBG 的反射光谱如图 4(a)所示。可见,随着温度的升高,反射光谱的形状基本保持不变,反射波长随温度的升高向长波方向缓慢移动,相应的峰值功率缓慢增加。当换用折射率为 1.380 的匹配液后,反射光谱的功率有所下降,加温过程中反射光谱的带宽变化逐渐明显,开始出现多峰现象,但基本与蒸馏水中的反射光谱具有相同的变化规律,光谱变化并不影响对功率和反射波长的测量。当换用折射率为 1.456 的匹配液以后,光谱功率明显降低,在 20 °C 时观察不到反射光谱。分析认为,液体折射率的增加使得其与纤芯折射率的差值越来越小,导致更多的传输光以倏逝场的形式与液体相互作用而产生能量损失,因此反射光越来越弱,直至不出现反射光。但是,由于温度升高,液体的折射率会减小,继而使反射光增强,当温度升高至 30 °C 附近时,可看到微弱的反射光谱;当温度升高到 33 °C 时,反射光谱如图 4(b)中左侧第 1 个图所示。

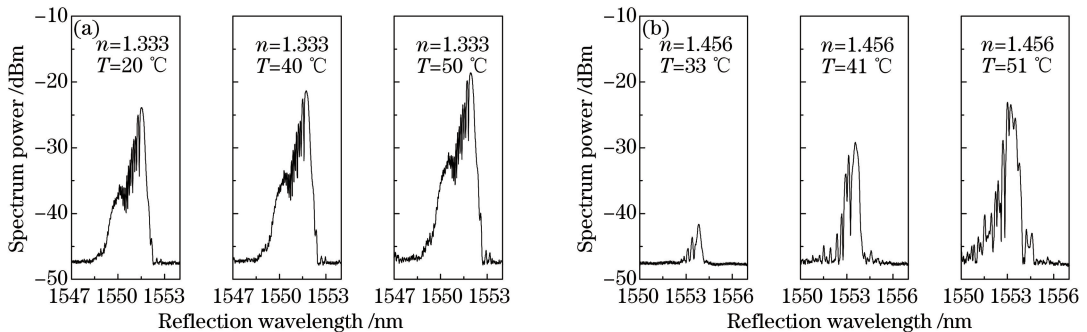


图 4 不同液体中 MNFBG 的反射光谱。(a)蒸馏水;(b)折射率为 1.456 的匹配液

Fig. 4 Reflective spectra of MNFBG surrounded with different liquids. (a) distilled water; (b) liquid with refractive index of 1.456

在升温测量过程中,反射光谱会发生明显的变化,图 4(b)为不同温度下的反射光谱。随着温度升高,反射光谱的带宽明显变宽,多峰现象和光谱功率变化更加明显。当温度高于 55 °C 后,光谱展宽和多峰问题的产生导致无法对反射中心波长进行测量。考虑到所用折射率匹配液的工作温度,实验中将测量范围设定为 55 °C 以下。不同液体中 MNFBG 反射光谱形状的变化不仅与液体温度、折射率有关,还与其表面的光滑程度有关,表面越粗糙,环境折射率越高,则反射光谱将变得越不光滑。正如图 4(a)、(b)的最右侧的图所示,同样的 MNFBG 用初温折射率为 1.333 和 1.456 的液体封装以后,即使在相同温度附近,反射光谱形状也会呈现较大的差异。

图 5 为在不同折射率液体中测得的 MNFBG 反射波长随温度的变化曲线。通过对比可以发现,当环境液体的折射率分别为 1.333 和 1.380 时,随温度的升高,反射波长均向长波方向保持线性移动,而反射波长-温度灵敏度则随液体折射率的增大而降低,液体为蒸馏水时的反射波长-温度灵敏度为 9.3 pm/°C,折射率为 1.380 的匹配液的反射波长-温度灵敏度降低至 7.4 pm/°C。虽然此时的温度变化并没有改变反射波长的移动方向,但却改变了反射波长移动的温度灵敏度,相对于普通 FBG 的 10.1 pm/°C 的温度灵敏度而言, MNFBG 的温度灵敏度已经明显降低。与此同时,换用折射率为 1.380 的匹配液后,反射波长随温度变化的拟合线性度也由蒸馏水时的 99.9%降低到了 99.3%。出现这种现象的主要原因为: MNFBG 反射波长随环

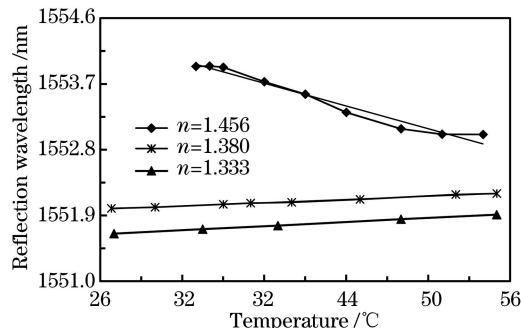


图 5 不同折射率液体中 MNFBG 的反射波长随温度的变化

Fig. 5 Variation in reflection wavelength with temperature of MNFBG surrounded with liquids with different refractive indexes

境液体折射率的增大而呈非线性红移,即随着环境液体折射率的增加,反射波长漂移对应的折射率灵敏度逐渐提高<sup>[18]</sup>。因此,当换用折射率为 1.380 的匹配液后,反射波长的折射率灵敏度已经比蒸馏水时的有所提高,再加上蒸馏水的热光系数 ( $-1 \times 10^{-4}$  RIU/°C) 比折射率为 1.380 的匹配液的热光系数 ( $-4 \times 10^{-4}$  RIU/°C) 小,因此同样的温度变化,因液体热光效应引起的反射波长紫移现象在换用折射率为 1.380 的匹配液后变得逐渐明显,起到了削弱光纤材料本身热效应所引起的反射波长红移现象。环境液体的温度越低,其对应的热光效应对反射波长的影响也将越明显,液体热光效应与光纤材料本身热效应的共同作用,使得反射波长的温度灵敏度逐渐降低,从而使得反射波长-温度曲线的线性度变差,即反射波长随温度的升高而红移的非线性效应增强。因此,当液体折射率为 1.380 时,温度灵敏度降低至 7.4 pm/°C,且对应的反射波长-温度曲线的线性拟合度也由蒸馏水时的 99.9% 降低至 99.3%。

通过上述分析可以得到,增大环境液体的折射率和热光系数,可以增强液体热光效应对 MNFBG 反射波长漂移的影响,实现对光纤材料本身热效应引起的反射波长移动的补偿甚至过补偿,进而改变 FBG 的反射波长-温度特性。当换用热光系数为  $-4 \times 10^{-4}$  RIU/°C、折射率为 1.456 的匹配液时,环境液体的热光效应导致由液体折射率变化引起的低温区域的反射波长移动明显大于由光纤材料热膨胀效应引起的反射波长移动,所以温度较低时,反射波长随温度的升高明显向短波方向呈非线性移动。当温度升高引起液体折射率减小时,MNFBG 的折射率灵敏度降低,则随温度的升高,反射波长的漂移量减小,即液体的热光效应开始减弱,因此在升温过程中虽然反射波长能够保持紫移,但随温度的升高,反射波长的紫移趋于平缓。随着温度进一步升高,光栅本身的热膨胀效应导致的反射波长红移开始与液体热光效应引起的反射波长紫移相当,则温度高于 50 °C 以后,可观察到反射波长对温度变化趋于不敏感。因此,对于不同的温度,MNFBG 具有不同的反射波长和温度灵敏度,其在 33 °C ~ 54 °C 区间的平均温度灵敏度为  $-50.3$  pm/°C,是普通 FBG 温度灵敏度的 5 倍,此时 MNFBG 的反射波长移动特性主要取决于环境液体热光效应对反射波长的影响,受此因素的影响,反射波长随温度变化的线性拟合度也进一步降至 92.3%。这一结果进一步说明了上述分析结论的正确性,模拟参数的选取可能与实际使用的光栅参数存在一定差异,导致理论结果与实验结果之间存在一定的差异,但并不影响相关结论和规律的得出。

## 4 结 论

对液体环境中 MNFBG 反射波长随温度的变化特性进行了详细的理论与实验研究。在考虑温度变化所引起的液体热光效应和纤芯材料的热膨胀效应、弹光效应、热光效应以及热膨胀致使芯径变化产生的波导效应的基础上,数值模拟并分析了不同折射率液体对 MNFBG 反射波长随温度变化的影响。这种液体封装的 MNFBG 反射波长随温度变化的特性,不仅与其自身的尺寸有关,而且与周围液体的热光效应相关。研究发现,通过减小芯径尺寸和增大封装液体的折射率,可以明显改变 FBG 反射波长随温度的升高而向长波方向线性移动的特性,甚至使反射波长随温度的升高而向短波方向移动。这种处于液体环境中的 MNFBG 在液体热光效应的影响下,其反射波长随温度的变化主要依赖于环境液体,MNFBG 的这种特性可被应用于环境折射率、温度的区分测量和基于 MNFBG 的新型热光功能器件的研制中,从而进一步拓展 FBG 在光传感和光通信领域的更多功能化应用。

## 参 考 文 献

- [1] Kang Zexin, Sun Jiang, Ma Lin, *et al.* Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506004.  
康泽新, 孙 将, 马 林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506004.
- [2] Zhao Hongxia, Cheng Peihong, Ding Zhiqun, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, refractive index and liquid level based on biconical fiber gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1010005.  
赵洪霞, 程培红, 丁志群, 等. 双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010005.

- [3] Jin J, Lin S, Song N F. Irradiation effect on strain sensitivity coefficient of strain sensing fiber Bragg gratings[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(1): 254-259.
- [4] Liang Ruibing, Sun Qizhen, Wo Jianghai, *et al.* Theoretical investigation on refractive index sensor based on Bragg grating in micro/nanofiber[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10): 104221.  
梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海, 等. 微纳尺度光纤布拉格光栅折射率传感的理论研究[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 104221.
- [5] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H, *et al.* Investigation on micro/nanofiber Bragg grating for refractive index sensing[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1128-1133.
- [6] Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1025-1035.
- [7] Wang G H, Shum P P, Ho H P, *et al.* Modeling and analysis of localized biosensing and index sensing by introducing effective phase shift in microfiber Bragg grating ( $\mu$ FBG)[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8930-8938.
- [8] Kou J L, Ding M, Feng J, *et al.* Microfiber-based Bragg gratings for sensing applications: A review[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8861-8876.
- [9] Ma Chengju, Xu Weifeng, Li Jiamei, *et al.* Research progress of gas sensor based on microfiber evanescent field effects [J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2015, 52(10): 100003.  
马成举, 徐卫锋, 李佳美, 等. 基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100003.
- [10] Zhang Y, Lin B, Tjin S C, *et al.* Refractive index sensing based on higher-order mode reflection of a microfiber Bragg grating[J]. Optics Express, 2010, 18(25): 26345-26350.
- [11] Lee S M, Saini S S, Jeong M Y. Simultaneous measurement of refractive index, temperature, and strain using etched-core fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(19): 1431-1433.
- [12] Dai J X, Yang M H, Li X B, *et al.* Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber Bragg grating[J]. Optical Fiber Technology, 2011, 17(3): 210-213.
- [13] Kamikawachi R C, Abe I, Paterno A S, *et al.* Determination of thermo-optic coefficient in liquids with fiber Bragg grating refractometer[J]. Optics Communications, 2008, 281(4): 621-625.
- [14] Iadicco A, Campopiano S, Cutolo A, *et al.* Refractive index sensor based on microstructured fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(6): 1250-1252.
- [15] Ran Y, Tan Y N, Sun L P, *et al.* 193 nm excimer laser inscribed Bragg gratings in microfibers for refractive index sensing[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18577-18583.
- [16] Dai J X, Yang M H, Li X B, *et al.* Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber Bragg grating[J]. Optical Fiber Technology, 2011, 17(3): 210-213.
- [17] Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 1007-1009.
- [18] Zhang W, Liu Y G, Zhou H. Theoretical investigation on the temperature characteristics of liquid-cladding micro/nanofiber Bragg grating[J]. Journal of Modern Optics, 2014, 61(13): 1097-1102.