

文章编号: 0258-7025(2010)06-1434-06

基于侧边抛磨光纤光栅传感器的液体材料热光特性

唐洁媛^{1,2} 陈哲^{1,2*} 范若岩² 张军^{1,2} 李斯本²

(¹暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632)
²暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632)

摘要 利用单个侧边抛磨光纤光栅传感器上形成的双布拉格反射峰, 进行微量液体材料在光波长为 1550 nm 处的热光特性研究。通过测量得到传感器双反射峰波长差与覆盖聚合物材料折射率间的对应关系以及光纤传感器覆盖某待测液体时双反射峰波长差与温度的对应关系, 对这两个对应关系进行分析, 得到了美国 Cargille Lab 公司的三种聚合物液在光波长为 1550 nm 处的热光系数。该光纤传感器可用于分析折射率处于 1.4198~1.4479 液体材料的热光特性。

关键词 传感器; 光纤布拉格光栅; 侧边抛磨; 折射率; 热光特性

中图分类号 TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1434

Thermo-Optic Effect of Liquid Materials Based on Side Polished Fiber Bragg Grating Sensor

Tang Jieyuan^{1,2} Chen Zhe^{1,2} Fan Ruoyan² Zhang Jun^{1,2} Li Siben²

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

²Department of Opto-Electronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract Thermo-optic effect of liquid materials at optical wavelength of 1550 nm is investigated by use of a side polished fiber Bragg grating (FBG) sensor with double reflective Bragg wavelengths. The relationship between the difference of double reflective Bragg wavelengths of sensor and refractive index of overlaid liquid material is measured, and the relationship between the difference of double reflective Bragg wavelengths and temperature is measured when a liquid material overlays on the polished region of sensor. By analysis of the relationships above the thermo-optic coefficients of three liquids made by Cargille Lab are obtained at optical wavelength of 1550 nm. The fiber sensor could be used for measurement of thermo-optic characteristic of liquid materials as their refractive indexes are in the range of 1.4198~1.4479.

Key words sensors; fiber Bragg grating; side polishing; refractive index; thermo-optic effect

1 引言

通常液体材料的热光系数是通过阿贝折射仪来测定的, 但阿贝折射仪对所测样品量有要求, 且所用测量光波长也有限。光纤光栅 (FBG) 以其轻便、不

受电磁干扰、成本低廉、耐温性好、耐腐蚀、高灵敏度以及传感响应速度快等优点而在结构健康检测、石油化工、航天船舶、电力工业、医学和化学等领域具有良好的应用前景^[1]。研究表明, 当光纤光栅的光

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-22

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(10776009)和国家自然科学基金(60877044)资助课题。

作者简介: 唐洁媛(1982—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事光纤无源器件方面的研究。E-mail: tangjiey@163.com

* 通信联系人。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn

栅区包层由于侧边抛磨或腐蚀到距光栅纤芯仅几个微米时,抛磨区或腐蚀区环境折射率的变化会引起光纤光栅有效折射率 n_{eff} 的改变,从而调制了光纤光栅的光谱特性,根据此性质制成了各种基于有效折射率变化的传感器^[2~12]。然而,目前所报道的各种光纤光栅折射率传感器,较难解决外界干扰的问题,例如环境温度或应力的微小变化对测量结果的影响等,而利用光纤传感器测量材料的热光系数就恰恰需要解决环境温度的干扰问题。另外,有些学者使用 HF 酸腐蚀光纤法制作光纤光栅折射率传感器^[2~6],但存在机械强度差、难以实用化的问题。与之相比较,利用侧边抛磨技术制作的侧边抛磨光纤光栅折射率传感器^[7~13]有着机械强度高、易于与测量系统相连接等优点。本文利用单个侧边抛磨光纤光栅传感器上所形成的双布拉格反射峰,对少量液体材料在光波长为 1550 nm 附近处的热光特性进行了研究,这种方法可有效地减小环境温度或应力对光纤光栅传感器的测量干扰,提高材料热光系数测量的精度。

2 测量原理

采用轮式侧边抛磨法^[14]将光栅区包层抛磨到接近纤芯(如图 1 所示)。抛磨后光纤光栅的耦合方程^[15]为

$$\lambda_{\text{Bp}} = 2n_{\text{effp}}\Delta_p, \quad (1)$$

式中 λ_{Bp} 为抛磨光纤光栅反射峰波长; n_{effp} 为抛磨光纤光栅传导模的有效折射率,其数值除了与光栅区的几何结构、纤芯折射率及剩余包层折射率有关外,还与抛磨区环境折射率 n 有关; Δ_p 为抛磨光纤光栅周期常数。由(1)式可知,当外界因素引起抛磨光纤光栅有效折射率 n_{effp} 或光栅周期 Δ_p 变化时,光栅反射峰 λ_{Bp} 都会发生漂移。研究表明,光纤光栅反射峰对应力^[5]、环境温度^[5,6,13]以及抛磨区环境折射率^[4,7~9,11,12]极其敏感。

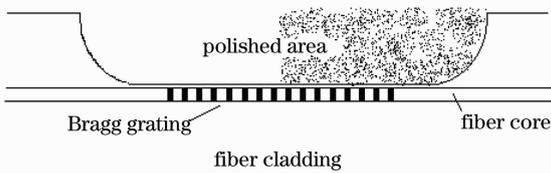


图 1 侧边抛磨光纤光栅覆盖聚合物液的示意图

Fig. 1 Side polished FBG overlaid by polymer liquid

当被测液体仅覆盖一段抛磨区时(如图 1 所示),原先的单布拉格反射峰分裂为双反射峰^[11],这

是由于抛磨区各部分环境折射率不同而产生的。这说明液体覆盖一段抛磨区相当于将一个光栅分为两段紧密串联的光栅,一段抛磨区无覆盖物,相当于参考光栅,而另一段抛磨区覆盖聚合物液,相当于测量光栅。这两段紧密串联的光栅具有相同的环境温度和轴向应力。对于抛磨区未覆盖液体的一段光栅,抛磨区环境折射率为空气折射率 $n=1$;对于抛磨区覆盖液体的一段光栅,抛磨区环境折射率变为液体折射率 $n=n_{\text{liquid}}$ 。由于 $n_{\text{liquid}}>1$,覆盖液体的一段光栅产生的反射峰波长值(称为右峰)大于未覆盖液体的一段光栅产生的反射峰波长值(称为左峰)。当环境温度、轴向应力以及抛磨区液体折射率均发生变化时,对(1)式求微分可得双反射峰漂移量 $\Delta\lambda_{\text{BL}}$ (左峰)和 $\Delta\lambda_{\text{BR}}$ (右峰)^[12]分别表示为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{BL}} &= 2\left(\Delta_p \frac{\partial n_{\text{effp}}}{\partial T} + n_{\text{effp}} \frac{\partial \Delta_p}{\partial T}\right)\Delta T + \\ & 2\left(\Delta_p \frac{\partial n_{\text{effp}}}{\partial l} + n_{\text{effp}} \frac{\partial \Delta_p}{\partial l}\right)\Delta l, \quad (2) \\ \Delta\lambda_{\text{BR}} &= 2\left(\Delta_p \frac{\partial n_{\text{effp}}}{\partial T} + n_{\text{effp}} \frac{\partial \Delta_p}{\partial T}\right)\Delta T + \\ & 2\left(\Delta_p \frac{\partial n_{\text{effp}}}{\partial l} + n_{\text{effp}} \frac{\partial \Delta_p}{\partial l}\right)\Delta l + 2\Delta_p \frac{\partial n_{\text{effp}}}{\partial n}\Delta n, \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $\partial n_{\text{effp}}/\partial n$ 表示抛磨光纤光栅有效折射率 n_{effp} 对抛磨区环境折射率 n 的变化率,该系数与环境折射率 n 及抛磨区形状或深度有关。因此,双反射峰波长差 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 为

$$\begin{aligned} \delta\lambda_{\text{BRL}} &= \Delta\lambda_{\text{BR}} - \Delta\lambda_{\text{BL}} = 2\Delta_p \frac{\partial n_{\text{effp}}}{\partial n}\Delta n = \\ & 2\Delta_p \frac{\partial n_{\text{effp}}}{\partial n}(n_{\text{liquid}} - 1), \quad (4) \end{aligned}$$

所以,双布拉格反射峰波长差仅与覆盖液体折射率 n_{liquid} 有关,而环境温度和应力的影响被抵消,利用这种特性就可构成高精度的折射率光纤光栅传感器。

由于热光效应,液体的折射率 n_{liquid} 与温度 T 有关,而根据(4)式, $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 又与 n_{liquid} 有关。所以,为了得到某未知液体材料的热光特性,可先在恒温条件下测量不同折射率聚合物材料覆盖传感器抛磨区产生的双反射峰波长差,即得到 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 与 n_{liquid} 的实验对应关系;再在变温条件下测量未知液体材料覆盖传感器抛磨区产生的双反射峰波长差,得到 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 随温度 T 的变化关系;结合两实验的对应关系,分析得到该未知液体的热光特性曲线,即该液体折射率 n_{liquid} 与温度 T 的关系。此方法可以直接消除温度变化引起的光纤光栅材料的热膨胀、热光效应以及轴向应力的干扰,提高测量精度。

3 实验装置及结果

3.1 实验装置和方法

采用轮式光纤侧面抛磨法对单模光纤光栅(光栅区长度 15 mm, 光栅反射峰中心波长 1584.14 nm)进行侧面抛磨加工, 抛磨后光栅反射峰为 1583.540 nm, 如图 2 所示。用精度为 0.1 μm 的细丝测量仪对其抛磨深度进行测量, 实测数据如图 3 所示, 横坐标为光纤光栅的轴向位置, 纵坐标为抛磨区光纤剩余厚度。由图 3 可知, 抛磨区长度约为 22 mm, 抛磨平坦区长度约为 15 mm, 抛磨后光纤的剩余厚度为 67.6 μm , 由于光纤光栅直径为 125 μm , 纤芯约 8 μm , 抛磨区表面距离纤芯外层约 1 μm 。

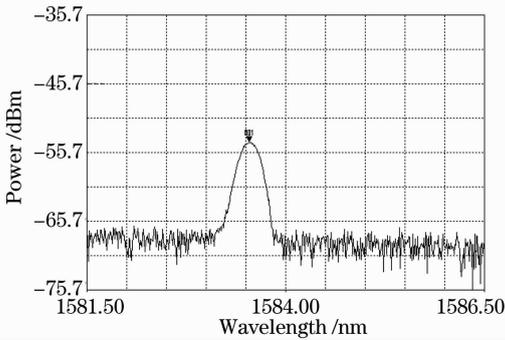


图 2 空气中侧面抛磨光纤光栅的反射谱
Fig. 2 Reflective spectrum of side polished FBG in air

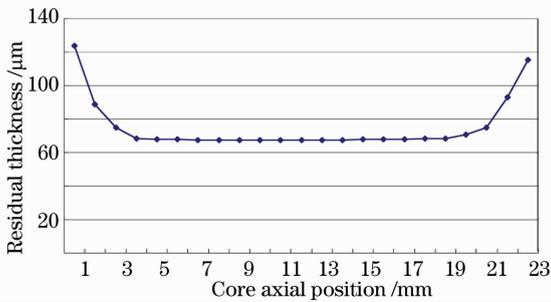


图 3 侧面抛磨光纤光栅剩余厚度曲线

Fig. 3 Graph of residual depth of side polished FBG

将制备好的侧面抛磨光纤光栅传感器按图 4 所示光路进行连接。在恒温(25 $^{\circ}\text{C}$)条件下, 将光纤光栅传感器侧面抛磨区的一段置于直径为 0.5 mm 的微细玻璃槽中。在槽中分别滴入少量不同规格的聚合物液(美国 Cargille Labs 公司生产, 光波长为 1.55 μm 处折射率推算值为 1.4198~1.4479), 使其只覆盖光纤侧面抛磨区的一段, 另一段仍在空气中。通过光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6317C, 分辨率为 0.01 nm)可以观测到光纤光栅传感器的布拉格反射峰由原先的一个分裂为两个, 如图 5 所示, 从而

获得双反射峰波长差 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 与抛磨区覆盖液体材料折射率 n_{liquid} 的实验对应关系曲线。

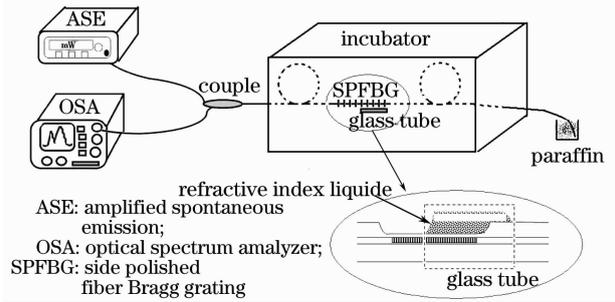


图 4 侧面抛磨光纤光栅传感器实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup for side polished FBG sensor

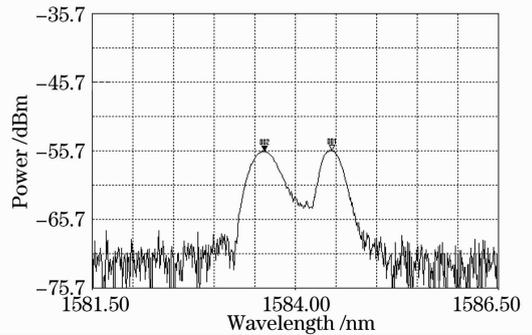


图 5 光纤光栅传感器一段抛磨区被聚合物液覆盖后的反射谱

Fig. 5 Reflective spectrum of side polished FBG sensor overlaid partly by polymer liquid

分别将折射率为 1.4439, 1.4418 和 1.4398 (25 $^{\circ}\text{C}$, 光波长为 1.55 μm 处的值) 的聚合物液覆盖此传感器一段抛磨区, 改变外界环境温度, 记录双布拉格反射峰的变化, 从而获得双反射峰波长差 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 与温度 T 的关系曲线。

将 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 与 n_{liquid} 的实验对应关系曲线和 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 与温度 T 的关系曲线结合起来, 对实验数据进行分析, 可得待测聚合物液的 n_{liquid} 与温度 T 的关系, 即待测液体的热光特性曲线 $n_{\text{liquid}} = f(T)$ 。

3.2 实验结果及分析

在室温(25 $^{\circ}\text{C}$)条件下, 在图 4 所示的微细玻璃槽中分别滴入少量折射率分别为 1.4198, 1.4298, 1.4318, 1.4338, 1.4358, 1.4378, 1.4398, 1.4418, 1.4439, 1.4459 和 1.4479 (25 $^{\circ}\text{C}$, 光波长为 1.55 μm 处的值) Cargille 聚合物液, 通过光谱分析仪测量侧面抛磨光纤光栅传感器双布拉格反射峰。图 6 中给出了折射率分别为 1.4298, 1.4338, 1.4418 和 1.4459 四种 Cargille 聚合物液的布拉格反射谱。各

图中三条曲线分别表示聚合物液覆盖此传感器前(曲线 A),覆盖此传感器一段侧边抛磨区(曲线 B)以及覆盖传感器整个侧边抛磨区后(曲线 C)的各反射谱。

以及覆盖传感器整个侧边抛磨区后(曲线 C)的各反射谱。

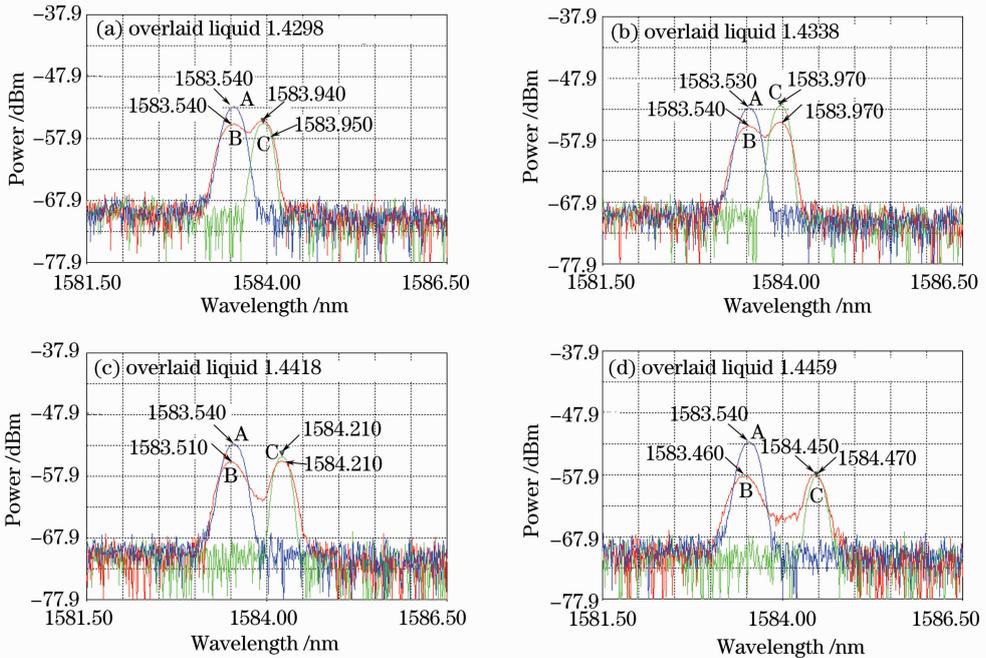


图 6 四种液体分别覆盖传感器侧边抛磨区前后的布拉格反射谱

Fig. 6 Reflective spectrum of side polished FBG in air or overlaid by liquids

图 6 曲线 B 中波长较短的反射峰(左峰)波长与曲线 A 中反射峰波长几乎相同(最大差值只有 0.08 nm),曲线 B 中波长较长的反射峰(右峰)波长与曲线 C 中反射峰波长也几乎相同(最大差值只有 0.02 nm),微小的波长差是由于实验过程中光纤光栅传感器所承受的轴向应力的微小变化引起的。这说明液体覆盖一段抛磨区的测量方法相当于将一个光栅分为两段相串联的光栅,一段抛磨区无覆盖物,

相当于参考光栅,而另一段抛磨区覆盖聚合物液,相当于测量光栅。与只抛磨光栅区左半部分外包层(做测量用)而保留右半部分外包层(做参考用)的方法相比,抛磨整个光栅区包层,仅在测量时将待测液体覆盖一段抛磨区而形成的相串联的两段光纤光栅,其抛磨区环境分别为空气和折射率大于 1.4 的待测液体,二者折射率差别较大,可导致较大的双反射峰波长差,有利于测量灵敏度的提高。

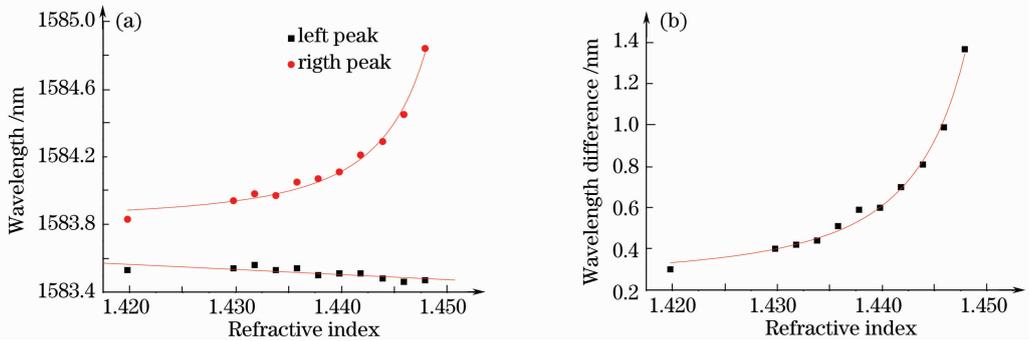


图 7 双布拉格反射峰波长(a)及其差值(b)与覆盖液体折射率的关系曲线

Fig. 7 Graphs of double reflective Bragg wavelengths (a) and their difference (b) versus refractive index of liquid

覆盖不同聚合物液可以得到双布拉格反射峰及其差值的折射率响应曲线,分别如图 7(a)和(b)所示。图 7(a)中下面一条曲线是波长较短的反射峰(左峰)变化曲线,为未覆盖聚合物液的一段光栅所产生,当聚合物液折射率变化时,左反射峰值变化较

小,其微小的漂移是由于环境因素(如应力、温度等)的改变而引起的。图 7(a)中上面一条曲线是波长较长的反射峰(右峰)变化曲线,为覆盖聚合物液的一段光栅所产生,右反射峰波长值受聚合物液折射率影响较大,由图 7(a)可知,当覆盖聚合物液折射率从

1.4198变化到1.4479(25 °C,光波长为1.55 μm)时,右反射峰波长值从1583.83 nm变化到1584.84 nm。由于光纤光栅反射峰波长受环境因素影响大,应力、温度等的微小变化都会引起反射峰波长漂移,所以直接利用光栅反射峰波长的漂移量测量折射率存在较大误差。

由于双布拉格反射峰相当于两段光栅串联,而这两段光栅所处环境温度相同,应力也相同,因此,根据(4)式,对图7(a)中双反射峰波长取差值可直接消除环境因素对测量结果的影响。双布拉格反射峰波长差值与对应覆盖聚合物液折射率响应曲线如图7(b)所示。由(4)式可知双反射峰差值与侧边抛磨区覆盖聚合物液的折射率相关,图7(b)表明,当覆盖聚合物液折射率从1.4198~1.4479,双反射峰波长差从0.3 nm变化到1.37 nm,采用洛伦兹曲线拟合(适用于光波长为1550 nm),得到双反射峰波长差值与侧边抛磨区覆盖液体的折射率关系的经验公式为

$$\Delta\lambda = 0.25349 + \frac{2 \times 0.11243}{\pi} \times \frac{0.00635}{4 \times (n - 1.45758)^2 + 0.00635^2}, \quad (5)$$

拟合后方差为0.00099。利用双反射峰波长差值可直接测量折射率,并降低温度、应力等环境因素的影响,不需要任何辅助测量。图7(b)还表明,该光纤传感器测量灵敏度与待测液体的折射率有关。当测量折射率大于1.44时,灵敏度较高,最高可达到203.62 nm/RIU(RIU表示折射率单元)。但测量折射率过大(大于1.4479),测量精度虽高,但因接近纤芯折射率而衰减增加,反而使得反射峰消失。

将1.4439,1.4418和1.4398三种Cargille聚合物液分别覆盖传感器一段抛磨区,改变环境温度(所用恒温箱温度控制精度为0.1 °C),得到三种聚合物液的双反射峰波长和波长差随温度变化的关系曲线,如图8所示。

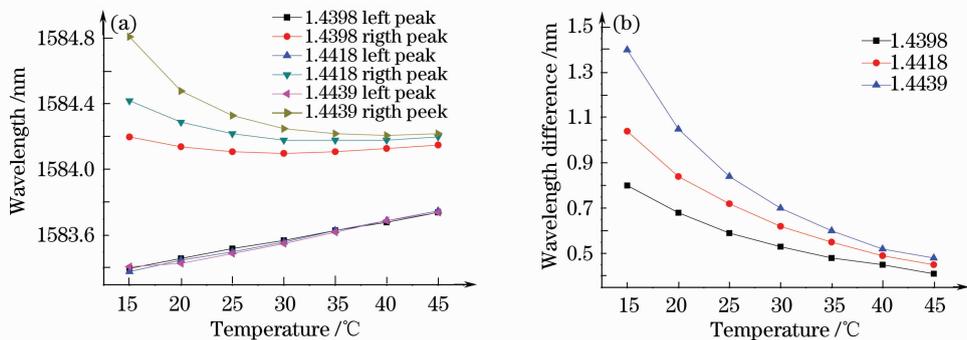


图8 三种聚合物液分别覆盖一段抛磨区时温度对双布拉格反射峰波长(a)和其差值(b)的影响

Fig. 8 Effects of temperature on the double reflective Bragg wavelengths (a) and their difference (b) when three different liquids are overlaid respectively

图8(a)中三种聚合物液分别覆盖一段抛磨区时,波长较短的反射峰为未覆盖液体的一段光纤光栅所产生,三种聚合物液分别形成的这三条曲线几乎重叠,与覆盖液体的折射率无关,均随温度的变化呈线性增长。这是由光纤光栅石英的热膨胀和热光特性引起的。可利用左峰曲线对环境温度进行测量时,通过曲线的斜率可以得到温度测量灵敏度为0.01 nm/°C。图8(a)中波长较长的反射峰为覆盖聚合物液的一段光纤光栅所产生。三种聚合物液分别形成的这三条曲线存在较大差异,随温度的增加呈非线性变化。这是由光纤光栅石英材料的热膨胀、热光特性以及覆盖聚合物液的热光特性共同引起的。由于产生双布拉格反射峰的单个光栅类似于两段光栅的串联,而这两段光栅在实验过程中所受温度相同,所以光纤光栅石英材料的热膨胀和热光

特性所引起的双反射峰波长漂移相同,对图8(a)中双反射峰波长取差值可得图8(b)中曲线,图8(b)中数据间接反应了聚合物液的热光特性。

由于(5)式已经给出抛磨区覆盖液体材料折射率 n_{liquid} 与双反射峰波长差 $\delta\lambda_{\text{BRL}}$ 之间的对应关系,将图8(b)中数据代入(5)式可计算出各温度值下产生相应波长差所对应的折射率值,即可得到三种聚合物液的热光特性曲线,如图9所示。

图9中数据线性拟合可得折射率分别为1.4439,1.4418和1.4398的三种聚合物液在光波长为1550 nm附近时热光系数分别为 $-0.000430/^\circ\text{C}$, $-0.000407/^\circ\text{C}$ 和 $-0.000413/^\circ\text{C}$ 。Cargille Lab只提供了测量光波长为589.3 nm时的热光系数分别为 $-0.000390/^\circ\text{C}$, $-0.000391/^\circ\text{C}$ 和 $-0.000392/^\circ\text{C}$,由于光波长不同,所以两组数据无法比较,但都说明聚

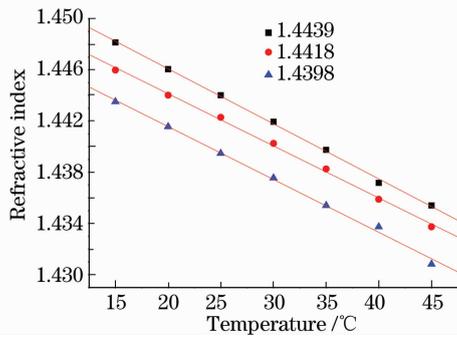


图9 测量得到的液体材料的热光特性曲线

Fig. 9 Thermo-optic characteristic curves of three liquids
合物液的热光系数与测量光波长有关。

4 结 论

利用单个侧边抛磨光纤光栅传感器上形成的双布拉格反射峰,可有效地对微量液体材料在光波长为 1550 nm 处的热光特性进行研究。采用轮式侧边抛磨法将光纤光栅区的包层抛磨到接近纤芯,构成折射率光纤传感器。利用侧边抛磨技术制作的侧边抛磨光纤光栅传感器,相对 HF 酸腐蚀光纤法制作的光纤光栅传感器,有着机械强度高、易于与测量系统相连接等特点。

将需要分析的液体材料覆盖侧边抛磨光纤光栅传感器的一段抛磨区,则可在单光栅上实现双布拉格反射峰。双布拉格反射峰波长差仅与覆盖液体折射率 n_{liquid} 有关,而外界温度和应力的干扰被抵消。此方法可以直接消除光纤光栅材料的热膨胀、热光效应以及轴向应力的外界干扰,提高测量的精度。利用这种特性就可构成高精度的折射率光纤传感器。

传感器抛磨区覆盖不同折射率聚合物液时,测量产生的双反射峰波长差,得到 $\Delta\lambda_{\text{BRL}}$ 与 n_{liquid} 的实验对应关系;传感器抛磨区覆盖待测聚合物液,在各种温度条件下,测量产生的双反射峰波长差,得到 $\Delta\lambda_{\text{BRL}}$ 随温度 T 的变化关系;结合两实验对应关系,可分析得到该待测聚合物液的热光特性,即折射率 n_{liquid} 与温度 T 的对应关系。

选用美国 Cargille Lab 公司的聚合物液作为研究对象,用侧边抛磨光纤光栅传感器对折射率为 1.4439, 1.4418 和 1.4398 三种聚合物液体进行分析,得到光波长为 1550 nm 时此三种聚合物液体的热光系数分别为 $-0.000430/^\circ\text{C}$, $-0.000407/^\circ\text{C}$ 和 $-0.000413/^\circ\text{C}$ 。利用侧边抛磨光纤光栅传感器进行液体材料热光特性分析的优点为实验装置简单;所需分析样品量少,只需覆盖传感器一段抛磨区即

可;不需通过其他辅助测量就可以减小环境因素对测量结果的干扰。该光纤传感器可应用于折射率处于 1.4198~1.4479 液体材料的热光特性分析。

参 考 文 献

- Zhao Yong. Optical Fiber Gratings and Sensing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 196~214
- 赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 196~214
- Paladino, A. Iadicco, S. Campopiano *et al.*. Notolithographic fabrication of micro-structured fiber Bragg gratings evanescent wave sensors[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 1042~1054
- X. Z. Sang, C. X. Yu, T. Mayteevarunyoo *et al.*. Temperature-insensitive chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, **120**: 754~757
- R. C. Kamikawachi, I. Abe, A. S. Paterno *et al.*. Determination of thermo-optic coefficient in liquids with fiber Bragg grating refractometer[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 621~625
- Huang Yan, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235
- 黄锐, 蔡海文, 崔荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. 中国激光, 2005, **32**(2): 232~235
- Feng Rui, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating with metal coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341
- 冯艳, 张华, 李玉龙等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型的制作方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 336~341
- Dong Xiaowei, Zhao Ruifeng. Detection of liquid-level variation using a side-polished fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technol.*, 2010, **42**: 214~218
- C. F. Chan, G. A. Ferrier, D. J. Thomson *et al.*. Evanescent field fiber Bragg grating sensors for index of refraction sensing with applications to structural health monitoring[C]. *SPIE*, 2006, **6176**(14): 614~617
- K. Usbeck, W. Ecke, R. Mueller *et al.*. A fiber Bragg grating refractometer [J]. *Measurement Science and Technol.*, 2001, **12**: 757~764
- K. Schroeder, W. Ecke, R. Willsch. Optical fiber Bragg grating hydrogen sensor based on evanescent-field interaction with palladium thin-film transducer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**: 1018~1022
- Liu Linhe, Chen Zhe, Bai Chunhe *et al.*. The effect of refractive index of material overlaid side polished area of FBG on Bragg wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 865~868
- 刘林和, 陈哲, 白春河等. 侧边抛磨区材料折射率对光纤光栅波长的影响[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 865~868
- Fan Ruoyan, Chen Zhe, Liu Linhe *et al.*. Optical fiber refractive sensor with double reflective wavelengths based on side polished fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(5): 1134~1139
- 范若岩, 陈哲, 刘林和等. 基于侧边抛磨光纤光栅双反射峰的折射率传感器[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1134~1139
- Chen Zhe, Liu Linhe. Temperature compensation of fiber Bragg grating based on side polishing and overlay [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 889~892
- 陈哲, 刘林和. 基于侧边抛磨与覆盖材料的光纤光栅温度补偿新方法[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 889~892
- Liu Linhe. Manufacture and characteristics of side-polished fiber grating[D]. Guangzhou: Jinan University, 2007. 29~34
- 刘林和. 侧边抛磨光纤光栅的制作及特性研究[D]. 广州: 暨南大学, 2007. 29~34
- Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Principle and Applications of Fiber Bragg Grating[M]. Beijing: Science Press, 2006. 137~140
- 饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 137~140