

# 基于多模干涉的在线型光纤迈克耳孙干涉仪的 传感特性

韩亮<sup>1</sup>, 邵敏<sup>1\*</sup>, 孙浩男<sup>1</sup>, 傅海威<sup>1</sup>, 乔学光<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

<sup>2</sup>西北大学物理学院, 陕西 西安 710069

**摘要** 提出并制作了一种基于多模干涉的在线型光纤迈克耳孙干涉仪,干涉仪由多模光纤熔接单模光纤构成。光从单模光纤进入多模光纤时,由于纤芯失配会激发出多个高阶模,这些高阶模与纤芯基模在多模光纤中耦合并发生模间干涉。制作的传感器样品的干涉谱条纹清晰,对比度高。液体折射率传感和温度响应特性实验结果表明在 1.3333~1.3796 RIU 的折射率范围内,干涉仪的液体折射率灵敏度为 -92.43 dB/RIU;在 25~75 °C 的水温范围内,干涉仪的液体温度灵敏度为 0.01 dB/°C。传感器结构简单,易于制作,成本低廉,其探针式结构在生物医学、石油化工等领域有一定的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 模间干涉; 多模光纤; 迈克耳孙干涉仪; 折射率传感器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170628

## Sensing Characteristics of In-Fiber Michelson Interferometer Based on Multimode Interference

Han Liang<sup>1</sup>, Shao Min<sup>1\*</sup>, Sun Haonan<sup>1</sup>, Fu Haiwei<sup>1</sup>, Qiao Xueguang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

<sup>2</sup> School of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

**Abstract** An in-fiber Michelson interferometer based on multimode interference is proposed and fabricated. The proposed interferometer comprises a section of multimode fiber (MMF) fusion-spliced with single mode fiber (SMF). When light enters the MMF from the SMF, multiple high-order modes are excited by core mismatching. These high-order modes and core mode propagate in the MMF and couple with each other to form intermodal interference. The interference fringes of the proposed sensor samples are clear with high contrast. Liquid refractive index (RI) sensing and temperature measurement experiments demonstrate that a liquid refractive index sensitivity of -92.43 dB/RIU is achieved for the liquid RI range from 1.3333 to 1.3796 RIU, and a temperature sensitivity of 0.01 dB/°C is obtained for a water temperature range of 25-75 °C. The proposed sensor is easy to fabricate and cost-effective. The probe structure of the proposed sensor has promising applications in biomedical and petrochemical fields.

**Key words** fiber optics; fiber sensing; intermodal interference; multimode fiber; Michelson interferometer; refractive index sensor

**OCIS codes** 060.2370; 280.4788; 060.2280; 120.5700

## 1 引言

折射率是有机化合物最重要的物理常数之一,

液体的折射率可以作为液体物质纯度的标准。液体折射率的测量对液体组成和理化性质的分析起着决定性作用,所以液体折射率的测量被广泛应用于食

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-06-13; 录用日期: 2016-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61805197)、西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS18111009)

\* E-mail: shaomin@xsyu.edu.cn

品加工、生物技术、医药科学和石油化工等领域。光纤传感器能满足实时、无损和快速准确的折射率测量,近些年来受到了广泛关注。典型的光纤折射率传感器包括光纤光栅型<sup>[1]</sup>、光纤干涉仪型<sup>[2]</sup>和倏逝场型<sup>[3]</sup>等,基于在线型光纤干涉仪的折射率传感器由于结构灵巧、灵敏度高及成本低等优点而被广泛研究。在线型光纤干涉仪是指在单根光纤上实现光的干涉,不使用除光纤外的其他耦合器件。与普通光纤干涉仪相比,在线型光纤干涉仪将耦合器和干涉臂集成到同一根光纤中,结构紧凑且易于制作。在线型光纤干涉仪通常使用纤芯失配<sup>[4]</sup>、熔融拉锥<sup>[5]</sup>、化学刻蚀<sup>[6]</sup>和激光加工<sup>[7]</sup>等方法激发出光纤的高阶模并实现基模与高阶模的干涉。其中,纤芯失配法较为简单有效,仅通过使用商用熔接机熔接两种不同芯径的光纤就可实现模间干涉,获得了极大关注,并取得了很多研究成果。

Chen 等<sup>[8]</sup>将单模-无芯-单模光纤结构和单模-多模-单模光纤结构级联起来,制作了一种复合结构的折射率传感器,在 1.333~1.381 的折射率范围内折射率测量灵敏度为 113.66 nm/RIU,在 30~95 °C 的温度范围内温度灵敏度为 9.2 pm/°C。Wang 等<sup>[9]</sup>制作了一种基于单模-多模芯-单模光纤结构的在线型 Mach-Zehnder 干涉仪,并将其用于折射率传感,结果显示该传感器在 1.336~1.372 液体折射率范围内的测量精度为  $5.3 \times 10^{-5}$  RIU。Wo 等<sup>[10]</sup>报道了一种单模-多模-单模-多模-单模光纤结构的折射率传感器,折射率传感实验表明该传感器在 1.3336~1.3889 折射率范围内,折射率测量灵敏度最大为 -96.85 nm/RIU。Zhou 等<sup>[11]</sup>设计了一种端面镀膜的单模-无芯光纤结构传感器,通过理论模拟和实验探究发现,该传感器在 1.33~1.38 折射率范围内的折射率测量精度为  $2.8 \times 10^{-5}$  RIU,当折射率高于 1.38 时,其折射率测量精度可达  $2.6 \times 10^{-6}$  RIU。尽管上述报道的基于纤芯失配型光纤折射率传感器的灵敏度高,但其结构较为复杂,如使用多种不同类型的光纤,需进行多次熔接或镀膜;而且,上述文献只研究了空气温度的响应特性,而对液体温度影响的讨论较少。

基于此,本文制作了一种简单的、无需镀膜的基于纤芯失配的在线型迈克尔逊干涉仪,干涉仪通过单模光纤(SMF)和多模光纤(MMF)熔接而成。利用纤芯失配所产生的高阶模与纤芯基模的模间干涉对外界环境折射率的敏感性,实现了折射率的测量。此外,讨论了传感器的液体温度响

应特性。

## 2 传感原理

传感器的结构原理图如图 1 所示,在单模光纤的一端熔接一段多模光纤。传感器的工作原理为:当光从单模光纤中进入多模光纤时,多模光纤的纤芯直径大于单模光纤的纤芯直径,会使得单模光纤包层中的一些能量进入多模光纤,产生高阶模。这些高阶模和纤芯基模在多模光纤中传输,并由多模光纤端面反射回多模光纤继续传输,然后在多模光纤与单模光纤熔接点处耦合并由单模光纤输出。纤芯基模和高阶模具有不同的有效折射率,因此产生了光程差,进而产生了模式干涉。在这个干涉仪中,只需熔接一次单模光纤和多模光纤,单模-多模光纤的熔接点先激发光纤的高阶模,再对纤芯基模和高阶包层模进行耦合,使得传感器的结构紧凑,且制作简单。多模光纤是干涉仪的干涉臂,其尾端面则作为反射镜来反射纤芯基模和高阶模,因此该传感器是一个典型的在线型迈克尔逊干涉仪。

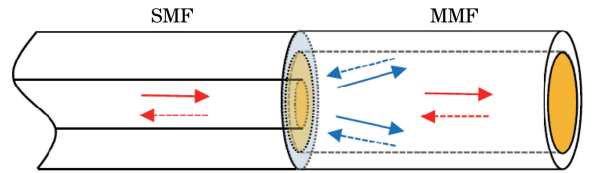


图 1 在线型迈克尔逊传感器结构原理图

Fig. 1 Schematic of in-fiber Michelson interference sensor

传感器的干涉谱主要由纤芯基模和高阶模决定,由干涉理论可知,迈克尔逊干涉仪的输出光强为<sup>[12]</sup>

$$I = [I_{\text{core}} + \sum_m I_{\text{cladding}}^{(m)} + \sum_m \sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^{(m)}} \cos \Delta\varphi] R, \quad (1)$$

式中: $I_{\text{core}}$ 为纤芯基模的光强; $I_{\text{cladding}}^{(m)}$ 为第  $m$  阶线性偏振模  $LP_{0m}$  的光强; $\Delta\varphi$  是纤芯基模与  $LP_{0m}$  之间的相位差。相位差的表达式为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} L (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}), \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为输入光波长; $L$  为多模光纤长度; $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$  分别为纤芯基模和  $LP_{0m}$  的有效折射率; $R$  为多模光纤端面的振幅反射系数,由 Fresnel 反射公式<sup>[13]</sup>决定:

$$R = \frac{(n - n_s)^2}{(n + n_s)^2}, \quad (3)$$

式中  $n$  和  $n_s$  分别是光纤和外界液体环境的折射率。当传感器的外界环境液体折射率发生变化时,首先

光纤端面的振幅反射系数会发生变化;其次,由于纤芯基模的有效折射率保持不变<sup>[14]</sup>,高阶模更容易受到外界环境折射率的影响,其有效折射率会随着外界液体折射率的变化而改变。因此,综合考虑这两种因素并结合(1)式可知,传感器的输出光场强度会随环境折射率的变化而变化,通过检测反射光强的变化,就可获取外界环境折射率的信息。

为了说明光在多模光纤中的传输特性,本研究使用光束传播法对单模-多模光纤结构进行理论模拟。在模拟参数设定中,输入光波长为 1550 nm,单模光纤和多模光纤的纤芯包层直径分别为 9.1  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$  和 105  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$ ,单模光纤和多模光纤的纤芯包层折射率分别为 1.4682/1.4628 和 1.4667/1.46。在单模-多模光纤结构中的光场分布模拟结果如图 2 所示,图中 0~1 mm 部分为单模光纤,1~20 mm 部分为多模光纤。可以明显地看到,在单模-多模光纤耦合点处,一部分单模光纤包层中的能量进入到多模光纤纤芯中,说明高阶模被成功激发。图 3 为理论计算得到的不同多模光纤长度时,单模-多模光纤结构的耦合系数。从图 3 可以看出,不同长度的多模光纤的耦合效率不同,通过选择多模光纤长度就可获得较高的耦合效率。假设熔接条件理想化,则多模光纤的长度对传感器的性能有着重要的影响。

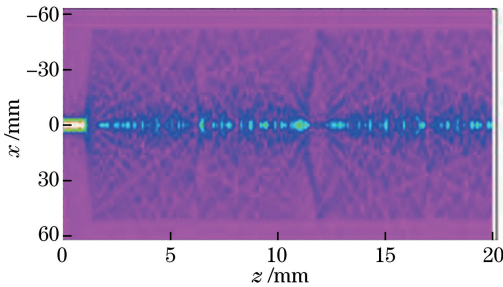


图 2 单模-多模光纤结构中光场分布

Fig. 2 Light field distribution in SMF-MMF structure

### 3 实验与讨论

实验中使用的单模光纤(SMF-28,康宁,美国)和多模光纤(SI2014-N,长飞,中国)的纤芯/包层直径分别为 9.1  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$  和 105  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$ 。制作时先使用光纤切刀将两根光纤的端面切除平整,然后使用光纤熔接机(S177,古河,日本)对两种光纤进行对芯熔接,熔接成功后再使用光纤切刀对多模光纤进行切割,通过设计截取的多模光纤的长度就可获得不同长度的干涉仪。

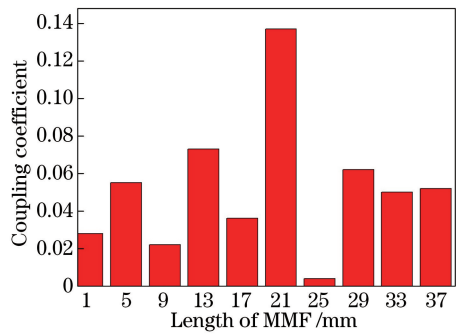


图 3 理论计算得到的不同多模光纤长度下的耦合系数

Fig. 3 Calculated coupling coefficients of MMFs with different lengths

本研究制备了不同长度多模光纤( $L=7, 11, 22$  mm)的传感器样品,其干涉谱如图 4 所示。从图 4 可以看出,干涉谱清晰,对比度较高,且具有较大的自由光谱范围。随着多模光纤长度的增大,干涉谱的周期数目增加。实验发现,在干涉仪制作过程中,多模光纤的长度、端面平整度和熔接条件均会影响干涉仪的性能。实验中使用的光纤熔接机可以在熔接过程中对电弧放电状态进行定量控制,所以熔接条件差异对干涉仪性能造成的影响可以忽略。因此多模光纤的长度和光纤端面的平整度是影响模式激发和耦合的主要因素,也决定了干涉仪的传感性能<sup>[15]</sup>。为保证传感器的性能,本实验中所有的光纤端面均严格切割平整。

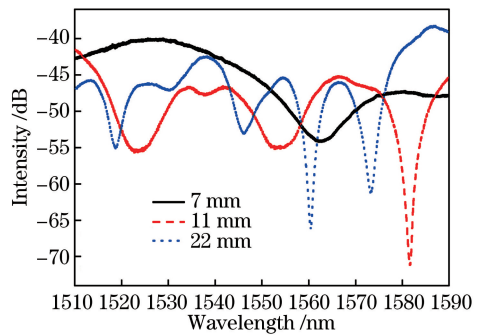


图 4 不同长度多模光纤在线型迈克耳孙干涉仪的干涉谱

Fig. 4 Interference spectra of in-fiber Michelson interferometer based on MMFs with different lengths

图 4 中非正弦、余弦的波形表明传感器的干涉谱由多套干涉叠加而成,为了进一步分析干涉图样的特性,对图 4 中的干涉谱进行了快速傅里叶变换,结果如图 5 所示。从图 5 可知,空间频谱图中有许多峰值,说明多个高阶模参与了干涉,验证了多模光纤中的多模式干涉。以多模光纤长度为 11 mm 的干涉仪为例,在空间频率位于  $0.037 \text{ nm}^{-1}$  处有一个明显的主峰,表明这个空间频率处的高阶模在整个

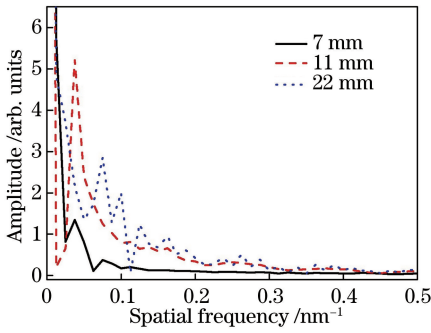


图5 不同长度多模光纤在线型迈克耳孙干涉仪空间频谱

Fig. 5 Spatial frequency spectra of in-fiber Michelson interferometer based on MMFs with different lengths

干涉过程中占据主导地位,而位于较高空间频率处的一些低峰则意味着更多更高阶的模式被激发并参与了干涉。

测量液体折射率的实验装置原理如图6所示。光从自带激光光源的光纤解调仪(sm125, Micron Optics, 美国)发出进入传感器后,再经由传感器端面反射回解调仪,干涉仪的反射谱由计算机记录并输出。实验中使用的解调仪的波长范围为1510~1590 nm,分辨率为1 pm。实验中配制了不同浓度的NaCl溶液,通过阿贝折射计标定,测得溶液的折射率范围为1.3333~1.3796 RIU。在液体折射率的传感实验中,用滴管将液体样品滴在传感器上,并且保证使传感器头部全部浸在溶液中。为了避免时间过长导致的待测溶液因重力原因而浓度不均,在液体样品滴落稳定后快速记录干涉谱。在每一组液体测量结束后,反复用去离子水清洁传感器头部,并且在空气中自然干燥后再继续下一组液体折射率的测量,整个实验过程均在室温温度(24 °C)下进行。

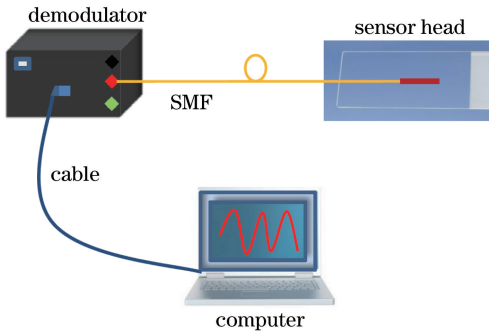


图6 折射率传感实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of refractive index sensing

实验中,先对制作的传感器样品进行液体折射率传感的研究。实验制得的传感器样品在不同折射率液体中的响应反射谱如图7所示,可以看到当液体折射率增加时,三个传感器的反射谱的强度均在

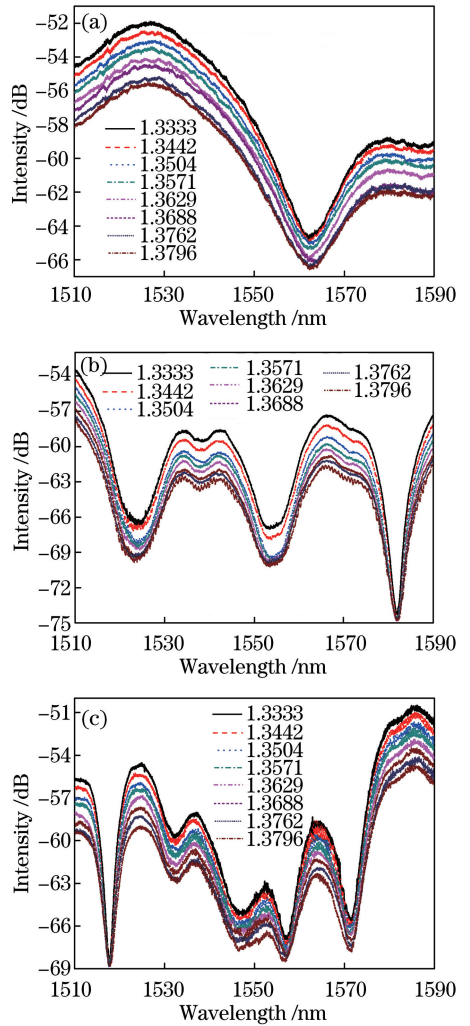


图7 传感器样品在不同折射率液体中的响应反射谱。

(a)  $L=7$  mm; (b)  $L=11$  mm; (c)  $L=22$  mm

Fig. 7 Reflection spectra of sensing samples with different liquid refractive indexes. (a)  $L=7$  mm; (b)  $L=11$  mm; (c)  $L=22$  mm

减小,而且几乎观察不到干涉谱中波长的漂移。为了研究传感器的折射率灵敏度,对于多模光纤长度为7, 11, 22 mm的三个传感器,分别选择位于1527.11, 1566.23, 1524.89 nm处的波峰作为测量对象,绘制出波峰处强度与折射率的变化曲线,如图8所示。图8表明当环境折射率从1.3333 RIU增加至1.3796 RIU时,三个波峰处的强度分别减小了3.65 dB、4.16 dB和4.13 dB,相应的液体折射率响应灵敏度分别为-77.91, -92.43, -88.91 dB/RIU,线性拟合度分别为0.99、0.99和0.98。折射率实验结果表明,光纤长度对传感器的响应特性有重要的影响,选择合适的光纤长度可以获得较高的灵敏度。

在液体折射率的测量中,须考虑液体温度的变



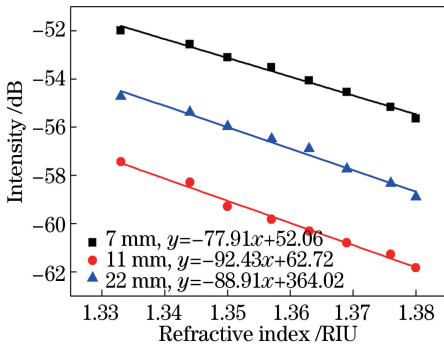


图 8 强度随液体折射率的变化曲线

Fig. 8 Intensity versus liquid refractive index

化对液体折射率测量的影响,但多数的折射率传感器都忽略了液体温度的变化,仅讨论传感器的空气温度响应特性。因此,进行了液体温度传感实验,以探讨液体温度对液体折射率传感的影响。在液体温度实验中,将传感器放入装满水的烧杯中,用酒精灯加热并用温度计测量水温。液体温度的实验结果如图 9 所示,实验结果表明,随着温度由 25 °C 上升到 75 °C 时,三个传感器的干涉条纹强度略有增大。干涉谱强度增大的原因是随着温度的升高,水的折射率减小,由前面的液体折射率传感实验结果可知干涉谱的强度应增大。

为了说明温度效应,图 10 绘制了三个干涉仪中分别位于 1527.11, 1566.23, 1524.89 nm 波长位置的波峰强度随液体温度的变化曲线,对实验结果进行线性拟合后得到三个干涉仪的温度灵敏度均为 0.01 dB/°C。并且可以计算得出,多模光纤长度为 7, 11, 22 mm 的传感器由温度影响的测量折射率误差分别为  $-1.28 \times 10^{-4}$ ,  $-1.08 \times 10^{-4}$ ,  $-1.12 \times 10^{-4}$  RIU/°C,这说明该传感器可以工作在室温下的折射率测量领域。

## 4 结 论

本研究制作了一种基于多模干涉的在线型光纤迈克耳孙干涉仪,并将其应用于液体折射率的测量。传感器由单模光纤与多模光纤构成,结构简单。液体折射率和温度传感实验结果表明,该传感器在 1.3333~1.3796 RIU 的液体折射率范围内的折射率响应灵敏度最高可达  $-92.43$  dB/RIU,液体温度灵敏度为 0.01 dB/°C。该传感器易于制作,结构简单,强度解调方式使得其成本更为低廉,在生物医学、

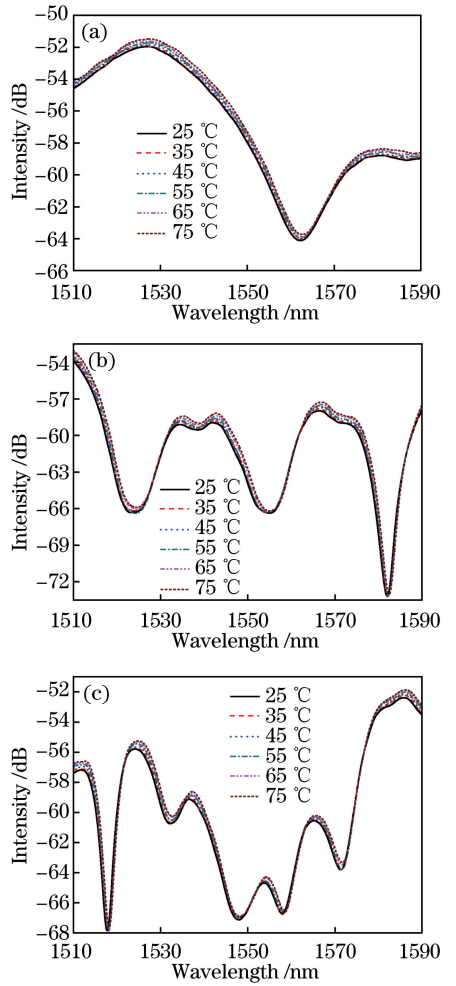


图 9 传感器样品在不同温度水中的响应反射谱。

(a)  $L=7$  mm; (b)  $L=11$  mm; (c)  $L=22$  mm

Fig. 9 Reflection spectra of sensor samples in water with different temperatures. (a)  $L=7$  mm; (b)  $L=11$  mm; (c)  $L=22$  mm

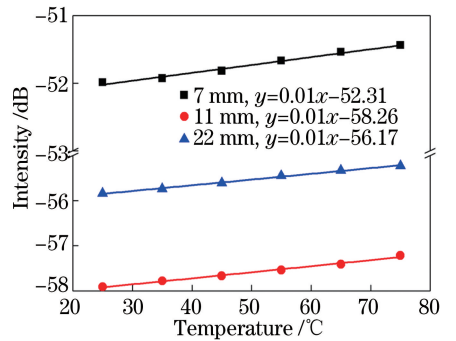


图 10 强度随温度变化曲线

Fig. 10 Intensity versus temperature

石油化工等领域有一定的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Luo B B, Zhao M F, Zhou X J, *et al.* Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306004.  
罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 基于结构化光纤 Bragg 光栅的折射率梯度传感器研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306004.
- [2] Meng H Y, Shen W, Zhang G B, *et al.* Michelson interferometer-based fiber-optic sensing of liquid refractive index [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 160(1): 720-723.
- [3] Peng W, Liu Y, Zhang X P, *et al.* High sensitivity evanescent field refractometer based on modal interference in micro-capillary wall[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(2): 430-435.
- [4] Wang Q, Zou H, Wei W. Strain and refractive index sensor based on core-offset splicing fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1006005.  
王旗, 邹辉, 韦玮. 基于偏芯熔接光纤的应力与折射率传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1006005.
- [5] Liang Y C, Liao C C, Lo Y L. Abrupt taper Michelson interferometer using heterodyne for measuring refractive index [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(23): 2330-2333.
- [6] Wu S N, Yan G F, Zhou B, *et al.* Fabry-Perot interferometer based on etched side-hole fiber for microfluidic refractive index sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9620: 962005.
- [7] Yuan L, Wei T, Han Q, *et al.* Fiber inline Michelson interferometer fabricated by a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4489-4491.
- [8] Chen Y F, Wang Y, Chen R Y, *et al.* A hybrid multimode interference structure-based refractive index and temperature fiber sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(2): 331-335.
- [9] Wang J F, Jin Y X, Zhao Y, *et al.* Refractive index sensor based on all-fiber multimode interference[J]. *Optik*, 2013, 124(14): 1845-1848.
- [10] Wo J H, Sun Q Z, Li X L, *et al.* A compact all fiber refractive index sensor based on modal interference [C] // 2012 IEEE Sensors, October 28-31, 2012, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE, 2012: 13256480.
- [11] Zhou X L, Chen K, Mao X F, *et al.* A reflective fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference in a coreless silica fiber [J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 50-55.
- [12] Shao M, Han L, Zhao X, *et al.* Liquid level sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328021.  
邵敏, 韩亮, 兆雪, 等. 基于在线型光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328021.
- [13] Ma Y, Qiao X G, Guo T, *et al.* Temperature-independent refractive index measurement based on Fabry-Perot fiber tip sensor modulated by Fresnel reflection[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(5): 050603.
- [14] Kim Y H, Park S J, Jeon S W, *et al.* Thermo-optic coefficient measurement of liquids based on simultaneous temperature and refractive index sensing capability of a two-mode fiber interferometric probe [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23744-23754.
- [15] Rong Q Z, Qiao X G, Wang R H, *et al.* High-sensitive fiber-optic refractometer based on a core-diameter-mismatch Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(7): 2501-2505.