

基于光纤环形腔高分辨率同时测量液位、折射率和温度的双波长激光传感器

张金文¹, 寿宇腾², 席洋

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150000)

摘要: 高精度液位测量在化工、石油储存、食品安全和公共供水等领域具有重要意义。光纤干涉仪具有低成本, 重量轻, 抗电磁干扰, 易于制造和耐腐蚀等系列优点。近期, 为提升检测灵敏度, 基于光纤干涉仪的方案在液位测试中被广泛应用和报道。目前, 受多激发高阶模的响应差异影响, 串扰/噪声的问题是不容忽视的。针对上述问题, 本文围绕细芯光纤错位结构及光纤环形腔激光器展开深入研究, 主要研究内容如下:

(1) 利用光束传播法, 分析了细芯光纤错位结构模式能量分布, 并在细芯光纤错位结构中获得了准单模态干涉状态的最佳错位区域为 $2.2\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 。分析了液位测试的传感原理, 并探究了在液位测试中的温度和折射率串扰问题。

(2) 通过细芯光纤错位型结构与光纤环形腔激光器相结合的方式, 构建了单纵模激光液位传感器, 提升了至少 16 倍的实际检测极限。进而, 构建了双波长激光液位传感器, 得到了稳定的双波长激光运转。

(3) 针对双波长激光传感器进行液位、折射率和温度的同时测量, 结合波长和强度同步解调的方式和逆灵敏度矩阵和补偿公式, 消除了细芯光纤的折射率和温度串扰, 实现了液位、折射率和温度的同时测量。

关键词: 液位传感; 细芯光纤; 模式干涉; 激光器; 交叉串扰

中图分类号: TP2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

模式干涉型光纤传感器是利用光在光纤中传输产生的相位差, 从而在在导出光纤处发生模式干涉。外界的环境量的变化会影响其干涉模式, 进而导致相位差发生改变。典型的模式干涉仪的液位传感器的灵敏度普遍在 $30\sim 40\ \text{pm/mm}$, 为了提高液位灵敏度, 2017 年 Yue

¹张金文 性别: 男 职称: 博士生 研究方向: 光纤传感 邮箱: 2419232161@qq.com

²寿宇腾 性别: 男 职称: 本科生 研究方向: 测控技术与仪器 邮箱: 1441957138@qq.com

Dong 等人提出无芯-D 型-无芯光纤液位传感结构并进行实验研究,在折射率为 1.377 的液体中的液位灵敏度提高到了 213.80 pm/mm。然而,基于波长解调的液位传感器只能使用光谱仪进行观察,为了提高实用性,强度解调的方式开始被关注和提出由于其可以使用功率计进行解调。典型的基于模式干涉的液位强度灵敏度为 0.15-0.25 dB/mm。2020 年, Jing Kang 等人证明了了一种基于准超细纤维的结构,在 0-8 毫米范围内增益为 0.972 dB/mm。之前的液位传感器都是在无源状态下的,由于无源状态下,传感器的线宽和消光比严重限制了传感器的实际检测分辨率。因此,为了提高分辨率,光纤激光传感器不断被提出,其中模式干涉仪作为梳状滤波器,并获得了大于 40 dB 边模抑制比和小于 0.05 nm 线宽。最近, Huaicheng Zhang 等人提出了一个液位激光传感器并获得了最大 43.32 dB 的边模抑制比和 0.02 nm 的线宽。

1.2 应用价值

自二十世纪七十年代以来,得益于光通信行业迅速发展,光纤具有体积小、抗腐蚀、质量轻和抗电磁干扰等优势,使得光纤在通信和传感等领域得到了更加广泛的应用。其中,光纤液位传感器在化学、石油化工、公共供水等领域备受关注由于其特有的优势。

光纤传感器是将光作为携带信息载体,光纤作为信息传输介质,将外界物理量(如温度、液位和折射率等)的变化都将转化为光谱的变化(如波长和强度等)。进而,为提高光纤传感器的灵敏度,对光纤进行特殊处理方式,如错位熔接、拉锥、腐蚀、磨抛和镀膜等。与传统电学传感器相比,光纤传感器不仅可以在同一结构中同时实现多参量测量,还可以消除在测试过程中其他环境参量的串扰,其中,光纤液位传感器具有极大的应用价值。

2 创新点与优势

2.1 难点

本次设计使用的双波长光纤环形腔激光器来测量液位、折射率和温度,其中基于模式干涉的 TCF 被用于液位传感, taper 用于 RI 传感并且 FBG 用于温度传感,其中对 TCF 进行结构制备时,如何获得最佳的干涉条纹以便于利用梳状滤波器的特性来激发一根单一的激光是一个难点,然而无源光谱的探测率会被较低的消光比(ER)和较大的线宽(LW)限制,如何提高探测精度是第二个难点,TCF 应用于液位测量,但是温度和 RI 等串扰会影响液位测量的准确度,如何消除串扰是第三个难点。

2.2 创新点

本文利用光束传播法分析和研究了不同错位量的细芯光纤错位结构的模式分布,并获得了 TCF 结构中的准单模态干涉状态的产生条件。这是本设计的第一个创新点;

由于干涉条纹的 ER 和 LW 的限制，导致探测精度较低，因此，本设计利用环形腔激光器的特性，将基于模式干涉的 TCF 转变为了一根单一的激光，至少提升了 16 倍的探测极限。这是本设计的第二个创新点；

基于模式干涉的 TCF 不仅对外界的液位变化有响应，当外界折射率和温度变化时，TCF 的干涉条纹也会发生强度或波长的变化，这极大的影响了测试结果，因此，使用一根 *m*-FBG 和 TCF 并联，实现了稳定的双波长激光器，并对液体的液位、折射率和温度进行同时测量，并并通过逆灵敏度矩阵和补偿公式将液位串扰压缩到 4% 以内。这是第三个创新点。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

一般的光纤激光器基本由泵浦光源、增益介质、反馈元件构成。双波长激光液位传感器的示意图如图 1 所示，主要由基于掺铒光纤放大器(EDFA)的光纤环形腔激光器，并与 *m*-FBG 和基于模式干涉的 TCF 构成。此外，EDFA 由一个 978 nm 激光二极管 (Oclaro LC96HH74P-20R) 作为泵浦源，一个 10 米长的掺铒光纤 (EDF, Nufern EDFL-980-HP) 作为增益介质和一个 980/1550 nm 波分复用器 (WDM)。然后，*m*-FBG 和 TCF 通过一个环形器 (Cir) 和一个分光比为 50:50 的耦合器连接。双波长激光输出通过分光比 10:90 的耦合器并由光谱分析仪 (OSA, Angilent 86142B, 分辨率为 0.06 nm) 观察和记录。此外，*m*-FBG 的强度应通过可变光衰减器 (VOA) 和偏振控制器 (PC) 进行调整。

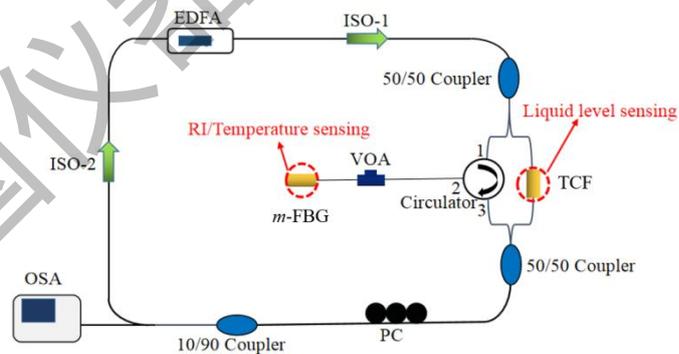


图 1 双波长环形腔激光器

采用的激光器类型为光纤环形腔激光器，相应实物图如图 2 所示。传感单元可以作为滤波器及传感头。EDFA 的组成中又包括激光二极管(Laser Diode, LD)、波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)和掺铒光纤(Erbium-doped optical fiber, EDF)。LD 波长随着半导体构成元素的不同而变化。用作一般光纤激光器泵浦光源如图 2 a)所示，常用的光纤激光器和放大器的 LD 为 14 脚蝶形封装。典型的 14 脚蝶形封装组件是单发射型，由 LD 芯片、光隔离器和热电制冷器构成，通过装在套管中的光纤进行输出；WDM 为波分复用器，如图 2 b)所示，是多个特定波长的光进行合束/分束的耦合器；EDF 在光纤激光器中常被用作增益

介质，为 3 能级模型，泵浦波长一般为 980 和 1480 nm，振荡波长约为 1550 nm。980 nm 泵浦相当于 1480 nm，泵浦光转换成信号光时，能量转换效率低，吸收光谱宽度更窄。

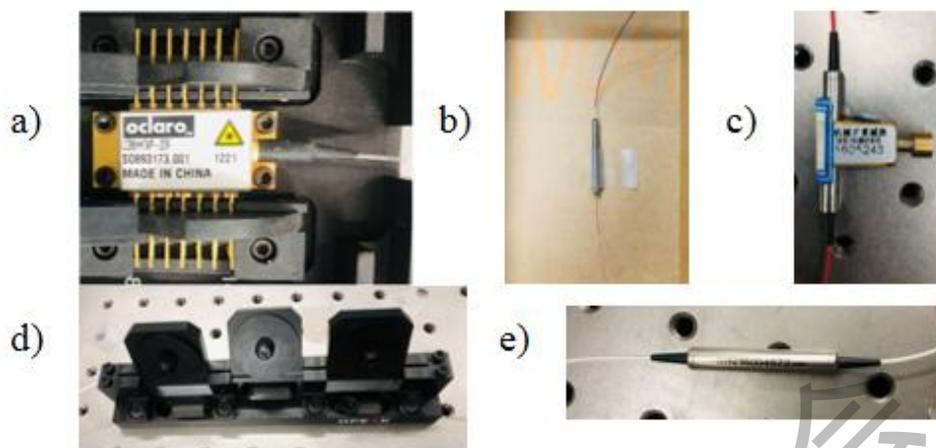


图 2 光纤激光环形腔系统中各组件 a) 激光二极管 b) 波分复用器 c) 可变光衰减器 d) 偏振控制器 e) 光隔离器

值得注意的是，使用基于模式干涉原理的滤波器时，激光器输出的激光往往并不是单纵模状态。多数情况下，是多纵模的激光输出。发生模式干涉时，由于光纤放大器的能量较高，在干涉光纤的包层中，有更多的模式被激发。多模式竞争的原始光谱如图 3 (a)所示。由于多模式竞争，导致了每一条激光的消光比均小于 25 dB，而通过调节 VOA 和 PC 的状态就可以得到图 3(b)所示的单纵模激光输出，且单纵模状态下的激光消光比提高到 34.9 dB，线宽为 0.1 nm。

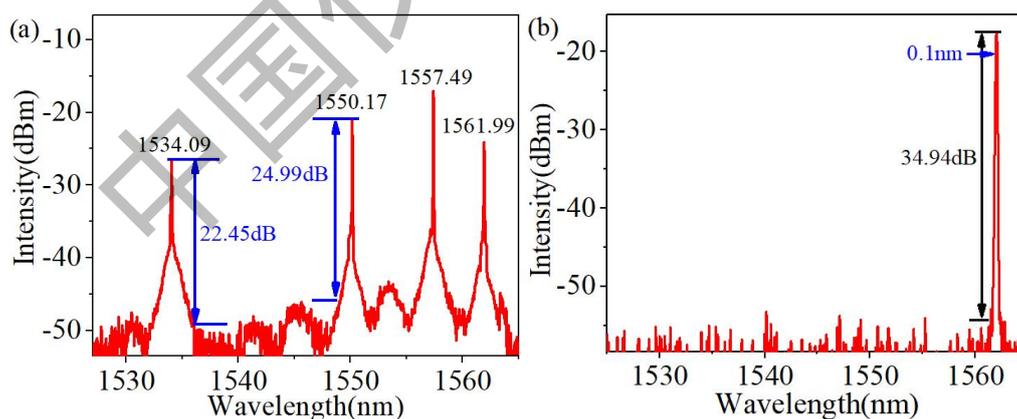


图 3 (a) 激光原始光谱 (b) 调节 PC 和 VOA 后的激光光谱

3.2 设计方法

虽然通过光纤激光环形腔系统，得到了消光比更大且线宽更窄的激光输出，进而得到了更良好的实际检测极限，但是在激光器中，由于 TCF 结构对液位的响应仍然是波长解调，导致实际的液位灵敏度和无源状态下相差无几。为消除环境串扰，基于光纤环形腔激光器，

设计了双波长环形腔激光器系统，并通过波长和强度同时解调的方式，进行了折射率、温度和液位的传感测试。

值得注意的是， m -FBG 和 TCF 结构的滤波性能相差较大。在环形腔激光器中需要调节 m -FBG 结构前的 VOA 才能够获得稳定的双激光。得到最佳双波长激光输出，探究了泵浦电流对其 ER 和 LW 的影响。当 m -FBG 和 TCF 一起接入光纤环腔时，如图 4 (a)所示，通过调整 VOA 和 PC 可以实现激光的两个稳定的激光。 m -FBG 的激发的激光(λ_{m-FBG})和 TCF 的激发的激光(λ_{TCF})的 ER 和 LW 随着泵浦电流的变化而变化如图 4(b)和(c)所示。当 $I_d=180$ mA 时，才会产生清晰的激光光谱，但 ER 都较小(λ_{TCF} 小于 24 dB)。只有当 $I_d=280$ mA 时，才能获得 ER> 30 dB 和 LW < 0.06 nm 的双波长激光。这一结果意味着双波长激光需要更多的泵浦能量来维持最佳的激光光谱。

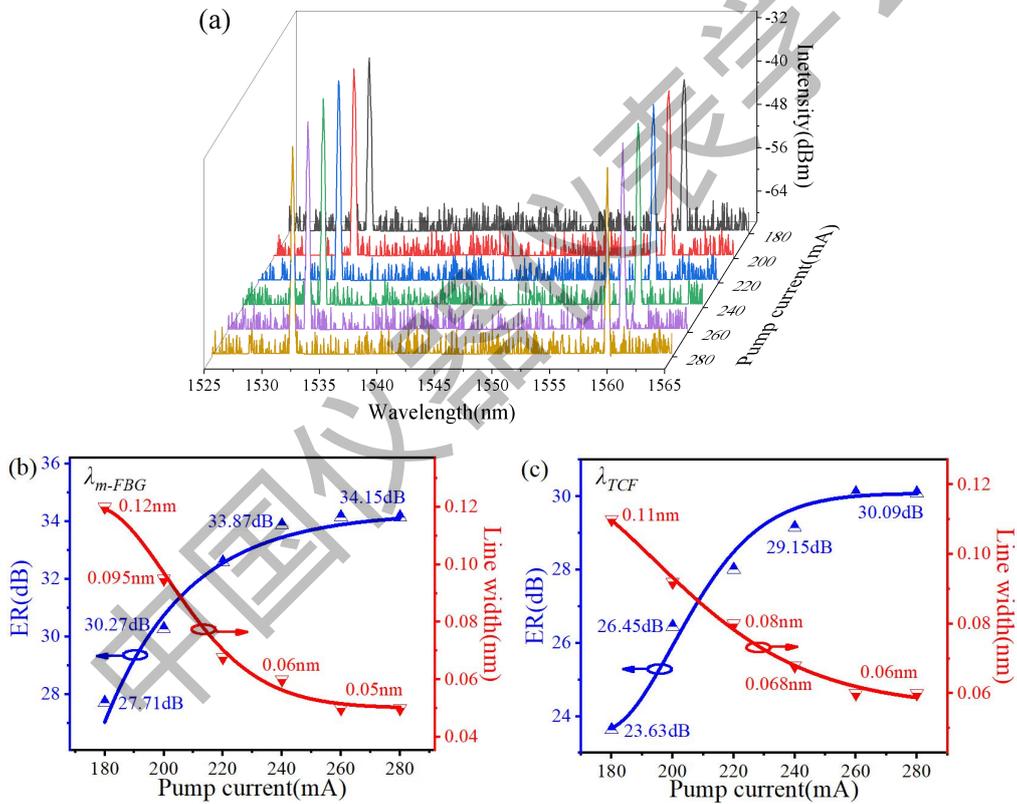


图 4 (a)双波长激光器的激光光谱和(b) λ_{m-FBG} 和(c) λ_{TCF} 的消光比和线宽。

为探究双波长激光的稳定性，在 $I_d=280$ mA 时，每隔 5 分钟记录一次，双波长激光的波长和强度稳定性如图 5 所示。其 m -FBG 激光波长在 0~60 min 范围内未发生任何波动，强度波动为 ± 0.52 dB；off-TCF 激光波长在 0~60 min 范围内变化为 ± 0.27 nm，强度波动为 ± 0.44 dB。显然，此双波长激光器在空气中的稳定性良好。

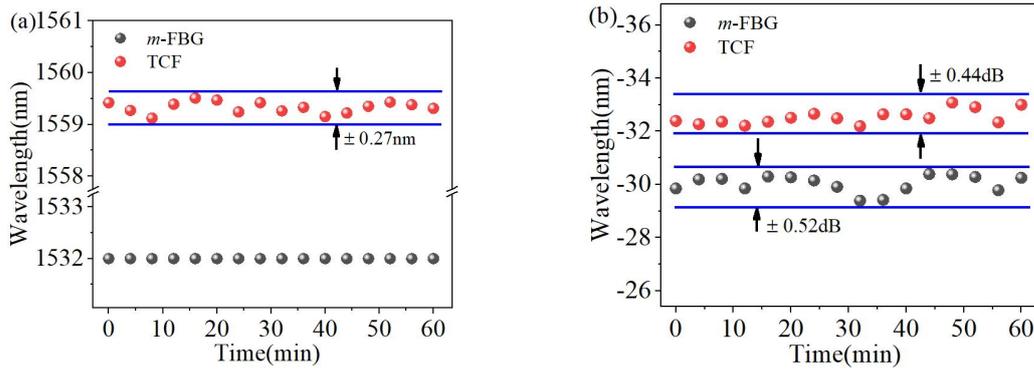


图5 双波长激光随时间的稳定性 (a) 波长 (b) 强度

实验中采用 TCF 测量液位变化，m-FBG 完全浸入液体中监测 RI 和温度的变化。实验装置如图 6 所示，其中 m-FBG 和 TCF 平行固定在容器侧壁上。然后将容器放在温度控制器上 (LICHEN, 202-00T, 在 0–100°C 范围内操作, 精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)。将 RI 为 1.3332 RIU 的纯水加入容器中, 直至其表面接触 TCF 的底部, 即定义为初始液位。然后分别对液位、RI 和温度进行综合测试。

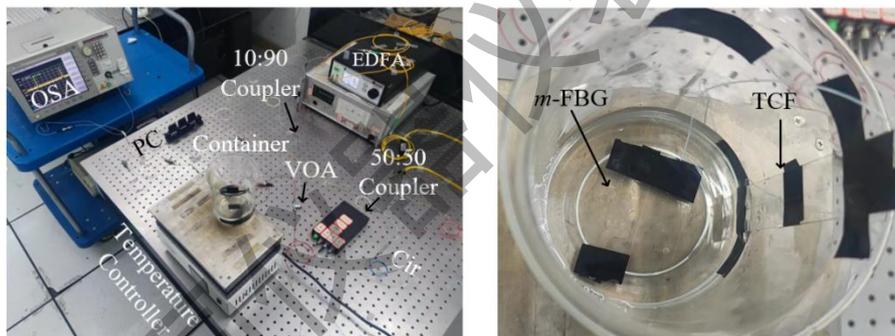


图6 实验测试装置

3.3 实验验证过程

3.3.1 三参量单独测量

加入少量纯净水, 使液面高度正好处于 TCF 的下方或刚好到达干涉臂, 将其放到温度控制器上, 使烧杯内液体的温度保持在 22°C , 待光谱稳定后进行液位测试。数据处理后的液位测试结果如图 7 所示, 在液位逐渐上升的过程中, TCF 部分的激光发生了明显的蓝移。Taper-FBG 激光的中心波长并不会随着液位的升高而产生变化, 并且激光强度随着液位的变化而产生的波动也小于 0.2 dB。激光共蓝移了 1.957 nm, 液位灵敏度为 39.48 pm/mm, 且依然能够保持 0.995 的高线性度。

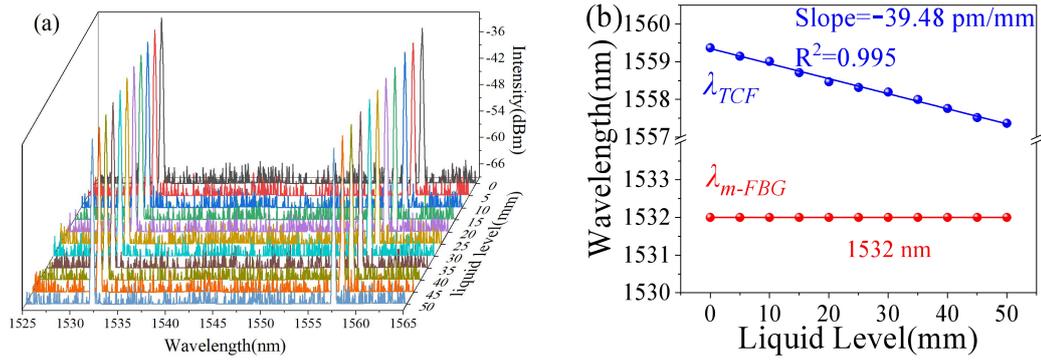


图 7 液位测试(a) 光谱图(b)灵敏度

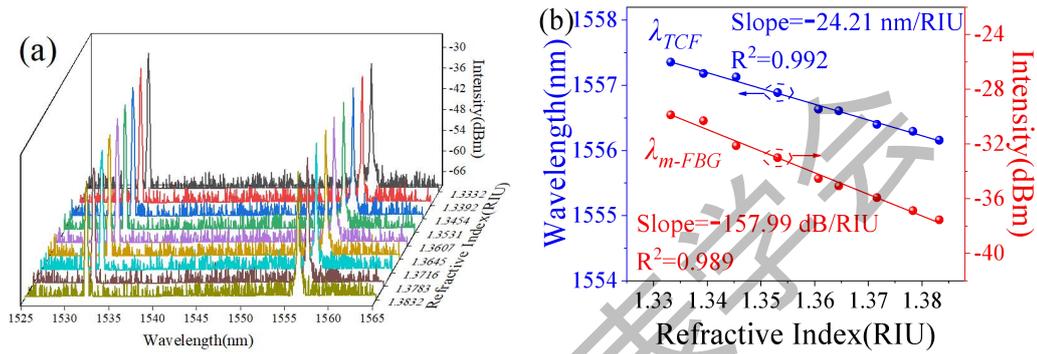


图 8 折射率测试(a)光谱图(b)灵敏度

将纯净水浸没过 m -FBG，进行 RI 测试。待光谱稳定后，记录第一次光谱，逐渐向纯净水中加入甘油溶液增加液体 RI。需要注意的是，在每次加入甘油后，需要将溶液充分搅拌后静置五分钟后方可进行记录，测试结果如图 8 所示。能够得知，当液体 RI 逐渐升高时， m -FBG 部分的激光消光比明显变小且 TCF 部分的激光发生蓝移。根据图 8 (b)可知，在 RI 测试的范围从 1.3332 升高到 1.3832 的过程中， m -FBG 部分激光的消光比下降了 7.8 dB，通过对其测试光谱的线性拟合，能够得到 m -FBG 结构中的 Taper 对液体 RI 的灵敏度为 157.99 dB/RIU，线性度为 0.989。TCF 对 RI 的响应为 24.21 nm/RIU，线性度为 0.992。

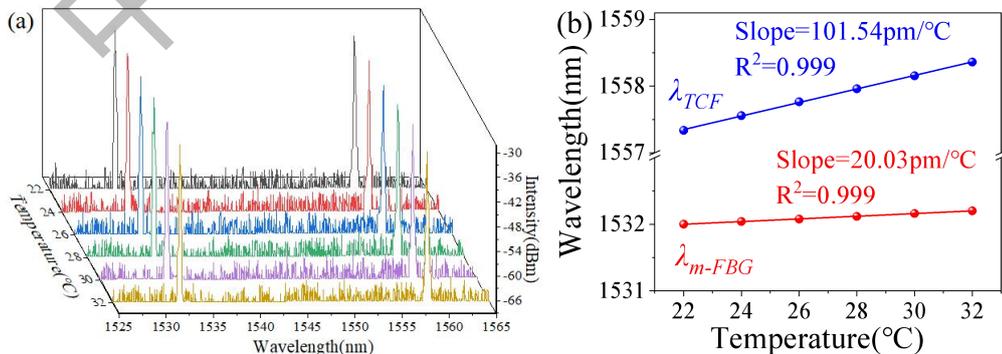


图 9 温度测试(a) 光谱图(b)灵敏度

在温度测试中，由于传感结构所处的环境为液体环境，采取水浴加热的方法。值得注意的是，采用水浴加热的方法可以更好地控制温度并减少测量误差，同时选择体积较小的烧

杯也可以让液体温度升高的时间缩短。向烧杯中加入纯净水直至完全浸没过 m-FBG 和 TCF 结构，将盛有水的烧杯放在温度控制器上，调节温度为 22 °C，当光谱稳定后开始测试。温度测试中，选择温度每升高 2 °C 时记录一次，温度测试结果如图 9 所示。当温度升高时，两束激光的中心波长均发生红移。其中 FBG 中心波长红移了 0.2 nm，TCF 中心波长红移了 1.02 nm。图 9 (b)为温度测试的线性拟合，计算出 m-FBG 对温度的响应为 20.03 pm/°C，TCF 对温度的响应为 101.54 pm/°C，线性度均为 0.998。

3.3.1 三参量同时测量

此外，使用双波长激光传感器同时测量 50 mm 液位测试范围、20 °C 温度测试范围和 0.0169 RIU 的折射率

测试范围进行同时测量。图 10 (a)可以观察到， λ_m -FBG 在 22~42 °C 范围内红移 0.398 nm，并在 1.3332~1.3501 RIU 范围内强度均匀降低约 2.63 dB。图 10 (b)可以看到 λ_m -FBG 的温度和 RI 灵敏度分别为 19.88 pm/°C 和 159.32 dB/RIU，与图 8 和图 9 中的折射率和温度测试结果相似。但是在同时测试中， λ_{TCF} 仅蓝移了 0.791 nm，并且相应的液位灵敏度如图 8 (c)中，仅为 17.11 pm/mm。这与图 7 获得结果相比，测量误差大于 60%。如此大的误差意味着在同时测量的状态下，液位完全无法被直接检测识别。

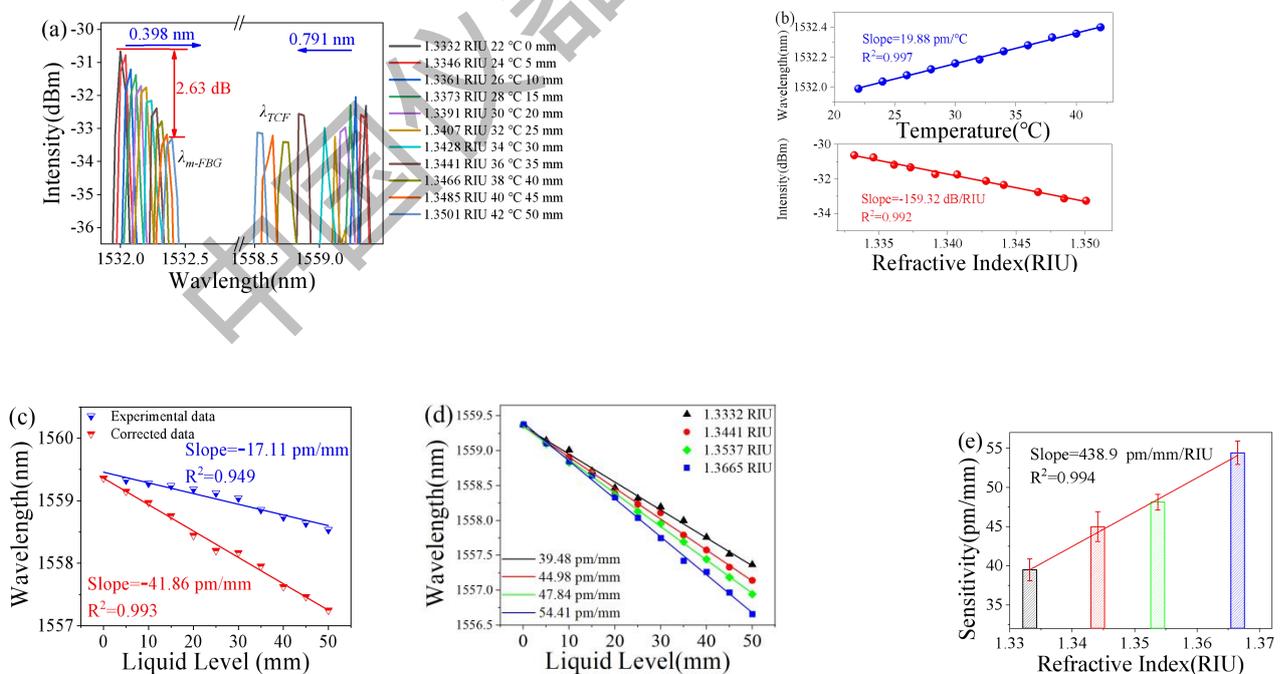


图 10 (a) 同时测量的光谱, (b) λ_m -FBG 的温度和 RI 灵敏度, (c) 测量和校正的液位灵敏度, (d) 不同 RI 的液位灵敏度(e) 液位灵敏度和 RI 的关系。

测量误差主要来源于 RI 和温度的串扰，为了降低测量误差，然后使用逆灵敏度矩阵来减少串扰并区分液位、RI 和温度的同时测量：

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta L \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T,\lambda 1} & K_{L,\lambda 1} & K_{n,\lambda 1} \\ K_{T,\lambda 2} & K_{L,\lambda 2} & K_{n,\lambda 2} \\ K_{T,I1} & K_{L,I1} & K_{n,I1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{m-FBG} \\ \Delta \lambda_{TCF} \\ \Delta I_{m-FBG} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

其中 $\Delta \lambda_{m-FBG}$ 和 $\Delta \lambda_{TCF}$ 分别是 λ_{m-FBG} 和 λ_{TCF} 的波长变化， ΔI_{m-FBG} 是 λ_{m-FBG} 的强度变化。 ΔT 、 ΔL 、 Δn 分别为温度、液位和 RI 的变化。 $K_{T,\lambda 1}$ 、 $K_{L,\lambda 1}$ 和 $K_{n,\lambda 1}$ 分别是 λ_{m-FBG} 的温度、液位和 RI 的波长灵敏度。 $K_{T,\lambda 2}$ 、 $K_{L,\lambda 2}$ 和 $K_{n,\lambda 2}$ 是 λ_{TCF} 的温度、液位和 RI 的波长灵敏度。 $K_{T,I1}$ 、 $K_{L,I1}$ 和 $K_{n,I1}$ 是 λ_{m-FBG} 的温度、液位和 RI 的强度灵敏度。因此，方程(4-1)可以改写为：

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta L \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01988 & 0 & 0 \\ 0.10154 & -0.03948 & -24.21 \\ 0 & 0 & -159.32 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.398 \\ -0.791 \\ -2.63 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

经计算， ΔT 和 Δn 的值分别为 20.02°C 和 0.0165 RIU。因此，RI 的误差为 2.4%，温度的误差为 0.1%。然而，获得的 ΔL 为 61.64 mm，与 50 mm 的实际测试范围依然有较大误差。这表明逆灵敏度矩阵具有降低液位测试误差的能力（从 60%降低到 22.8%），但依然有较大误差。消除温度和 RI 串扰后，液位测量误差主要是由于在不同的 RI 环境下，液位折射率的灵敏度也会发生变化。变图 8 (d) 实验表明液位灵敏度与 RI 的变化成正比。如图 10 (e) 所示，液位和 RI 的相关灵敏度($S_{RI liq}$)达到 438.9 pm/mm/RIU，非线性误差约为 1% (± 4.4 pm/mm)。因此，我们引入补偿公式，进一步消除因 RI 变化引起的液位测量误差。

$$\Delta L_r = \frac{\Delta L \times S_{liq}}{S_{liq} + S_{liq}^{RI} \times \Delta n} \quad (4-3)$$

其中 ΔL_r 是修正后的液位变化量， S_{liq} 为液位灵敏度。将数值带入后， ΔL_r 可以通过计算获得为 51.9 ± 0.08 mm，测量误差显著降低到 3.9%。相应地，图 10 (c) 中给出的校正液位灵敏度为 41.86 pm/mm，线性度为 0.993。

4 总结

本文利用光束传播法分析和研究了不同错位量的细芯光纤错位结构的模式分布，并获得了细芯光纤错位结构中的准单模态干涉状态的产生条件。并且制备干涉条纹较均匀的结构以提高梳状滤波器的滤波性能。

其次，无源光谱受限于 ER 和 LW，无法具有较好的探测精度，但由于激光会获得更高的 ER 和更窄 LW，这使探测精度提高了至少 16 倍。并将 *m*-FBG 和 TCF 的接入光纤环形腔激光器，利用光纤环形腔激光器组成了双波长光纤激光传感器，并应用于液位、RI 和温度的同时测量。

结果证实，由于 RI 的变化仅对 *m*-FBG 的强度有影响，温度变化仅对 *m*-FBG 波长有影响，因此 *m*-FBG 可以同时测量液体 RI 和温度的变化并通过波长和强度的联合解调。TCF 可以监测到的液位变化通过逆灵敏度矩阵和 RI 相关补偿公式进行精确补偿和解调，可以将误差压缩至 4% 以内。在同时测量状态下，温度、RI 和液位的灵敏度分别为 19.88 pm/°C、159.32 dB/RIU 和 39.48 pm/mm，误差分别为 0.1 %、2.4 % 和 3.9 %。因此，我们的方案在高精度多参数测量和工程监测方面具有很强的实用性和潜力。

参考文献：

- [1] M. M. Sun, Y. X. Jin, X. Y. Dong, All-fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level measurement, *IEEE Sensors Journal*, 15(7) (2015) 3984-3988.
- [2] Y. Dong, S. Y. Xiao, H. Xiao, J. X. Liu, C. R. Sun, S. S. Jian, An optical liquid-level sensor based on D-shape fiber modal interferometer, *IEEE Photonics Technology Letters*, 29(13) (2017) 1067-1070.
- [3] J. W. Zhang, H. Zhang, H. C. Zhang, X. Zhang, J. R. Yang, Intensity modulation optical liquid level sensor based on cascaded multimode-single-mode-multimode fiber structure, *Proceedings of SPIE*, 12057 (2021) 120570F-1.
- [4] J. Kang, L. T. Hou, Z. Li, X. J. Liu, X. D. Zhang, J. R. Yang, Low refractive-index and temperature crosstalk fiber-optic liquid level sensor based on cascaded quasi-Microfiber and double-cladding fiber structure, *IEEE Sensors Journal*, 21(2) (2021) 1554-1560.
- [5] H. C. Zhang, H. Zhang, L. T. Hou, M. Zhang, J. R. Yang, Self-temperature compensated fiber-optic liquid level sensor with ultra-long linear range using quasi-single modal interferometer, *IEEE Sensors Journal*, 21(13) (2021) 14868-14875.