

# 基于游标效应的温度传感器

谢佳一, 王朝宇, 赵昆鹏, 邢铭珈, 张庆洋, 李明宇<sup>1</sup>

(长春理工大学, 长春 130012)

**摘要:** 提出了一种基于游标效应的温度传感器。这种温度传感器由法布里-珀罗标准具和微环谐振腔级联组成, 其中法布里-珀罗标准具起到滤波的作用, 温度传感元件为微环谐振腔。分别利用波长探测方法和强度探测方法进行了传感器性能测试。实验结果表明, 波长探测灵敏度为  $1.4903\text{nm}/^\circ\text{C}$ , 探测范围为  $11.88^\circ\text{C}$ , 探测极限为  $0.0417^\circ\text{C}$ ; 强度探测灵敏度为  $1.5256\text{dB}/^\circ\text{C}$ , 探测范围为  $2^\circ\text{C}$ , 探测极限为  $0.045^\circ\text{C}$ 。这种基于游标效应的温度传感器具有体积小、灵敏度高、探测方式灵活、可实现低成本探测的优势。

**关键词:** 游标效应;法布里-珀罗标准具;微环谐振腔;波长探测;强度探测

## Temperature sensor based on vernier effect

Xie Jiayi, Wang Zhaoyu, Zhao Kunpeng, Xing Mingjia, Zhang Qingyang, Li Mingyu

(Changchun University of Science and Technology Chang chun 130012)

**Abstract:** A temperature sensor based on vernier effect is proposed. This temperature sensor is composed of a cascade connection of a Fabry-Perot etalon and a micro-ring resonator, wherein the Fabry-Perot etalon plays the role of filtering, and the temperature sensing element is a micro-ring resonator. The sensor performance was tested by the wavelength detection method and the intensity detection method, respectively. The experimental results show that the wavelength detection sensitivity is  $1.4903\text{nm}/^\circ\text{C}$ , the detection range is  $11.88^\circ\text{C}$ , and the detection limit is  $0.0417^\circ\text{C}$ ; the intensity detection sensitivity is  $1.5256\text{dB}/^\circ\text{C}$ , the detection range is  $2^\circ\text{C}$ , and the detection limit is  $0.045^\circ\text{C}$ . The temperature sensor based on the vernier effect has the advantages of small size, high sensitivity, flexible detection method, and low-cost detection.

**Keywords:** Vernier effect; Fabry-Perot etalon; microring resonator; wavelength detection; intensity detection

---

第一作者信息: (谢佳一, 女, 硕士研究生, 微纳光学与光子器件及应用, 344843194@qq.com)  
通讯作者信息: (李明宇, 男, 教授, 集成光学, limngyu@cust.edu.cn)

# 1 传感器设计背景和应用价值

设计背景:

基于光波导的传感器因为具有成本低、结构紧凑、集成度高等优点在近些年的研究中取得了一定的进展。由于光波导材料的热光效应,一些基于光波导的温度传感器也被设计出来。但是微环谐振腔的温度灵敏度受限于构成光波导材料的热光系数,在之前报道的结果中,基于波长探测的灵敏度数量级只能达到  $10\text{-}2\text{nm}/^\circ\text{C}$ [1,2]。波长探测需要价格昂贵的光谱仪或可调谐激光器,降低探测成本迫在眉睫。

应用价值:

基于游标效应的温度传感器体积小,封装后可与其他仪器集成,并且具有低成本和高灵敏度的优势,在工业、医学、生物等对温控要求较高等领域均有良好的应用前景。

## 2 创新点与优势

利用法布里-珀罗 (FP) 标准具和微环谐振腔(MRR)级联产生的游标效应,放大了灵敏度,降低了探测极限,并具有波长探测和强度探测两种探测方法,实现了低成本易集成的基于游标效应的温度传感器。可以应用于工业、医学、生物等对温控要求较高等领域中。

## 3 实现方案简介

### 3.1 设计原理

设 FP 标准具和 MRR 的自由光谱范围分别为  $FSR_F$  和  $FSR_M$ ,透射谱峰值恰好在波长为  $\lambda_0$  时重叠,  $k$  为整数, FP 标准具和 MRR 全部峰值位置为:

$$\begin{aligned}\lambda_{k,F} &= \lambda_M + kFSR_F \\ \lambda_{k,M} &= \lambda_M + kFSR_M\end{aligned}\quad (1)$$

FP 标准具和 MRR 透射谱线峰值出现第一个重合位置  $\lambda_0$  开始,直到  $k=K$  时 FP 标准具和 MRR 下一个干涉峰完全重合出现下一级联双环光谱包络峰值位置,则有:

$$\lambda_{F,K} = \lambda_{M,K+1}\quad (2)$$

FP 标准具和 MRR 级联后光谱包络周期为:

$$FSR_{FPMRR} = \lambda_{F,K} - \lambda_M\quad (3)$$

结合以上公式可以推导出 FP 标准具和 MRR 级联后的自由光谱范围为:

$$FSR_{FPMRR} = \frac{FSR_F \times FSR_M}{|FSR_F - FSR_M|}\quad (4)$$

当温度发生变化时，MRR 透射谱线漂移量为 $\Delta\lambda_{MRR}$ ，FPMRR 透射谱线包络漂移量为 $\Delta\lambda_{FPMRR}$ ，FP 标准具和 MRR 级联的温度传感器（FPMRR）产生的游标效应包络光谱灵敏度相对于单个 MRR 灵敏度可以提高的倍数是：

$$A = \frac{FSR_F}{|FSR_M - FSR_M|} = \frac{\Delta\lambda_{FPMRR}}{\Delta\lambda_M} \quad (5)$$

如图 1 (a) 所示，蓝色实线为 FP 标准具的透射谱线，红色实线为初始温度下 MRR 的耦合输出（drop）端透射谱线，红色虚线为温度增加 3°C 时 MRR 的耦合输出（drop）端透射谱线；如图 1 (b) 所示，红色实线为初始温度时 FPMRR 的透射谱线，蓝色虚线为温度增加 3°C 时 FPMRR 的透射谱线，红色实线和蓝色虚线分别为这两条透射谱线的包络。

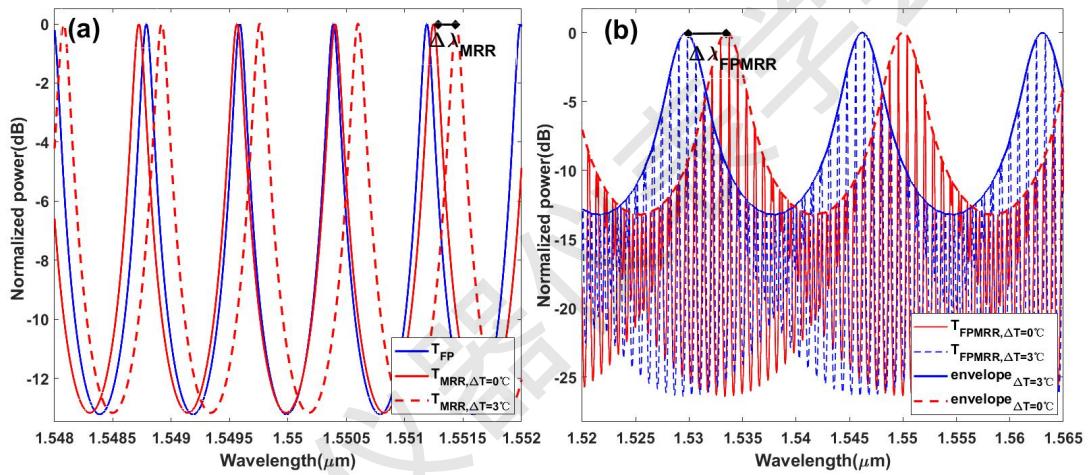


图 1 FP 标准具、不同温度时 MRR 及 FPMRR 的透射谱线

### 3.2 设计方法

基于游标效应的 FPMRR 温度传感器示意图如图 2 所示，其中 FP 标准具和 MRR 通过光纤阵列形成稳定连接，MRR 放在半导体制冷器（TEC）上，调节 TEC 的温度来使 MRR 升温。

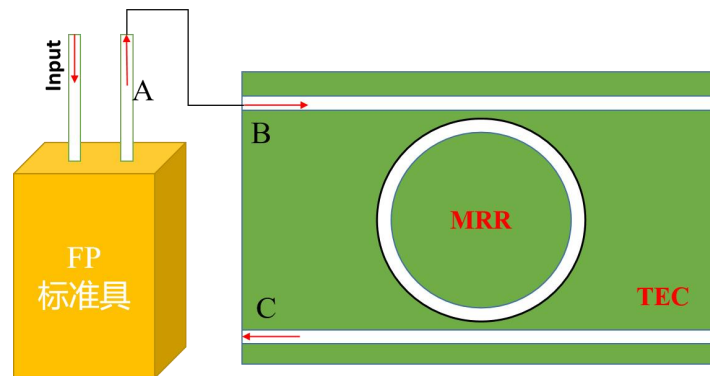


图 2 基于游标效应的 FPMRR 温度传感器示意图

### 3.2.1 波长探测方法

在波长探测方法下，输入光源为可调谐激光器（Agilent 81642B），图 2 中输出端 C 连接探测器（Agilent 81635A），用电脑软件控制 TEC 的温度并待其稳定后，对输出端 C 进行扫谱，记录不同的温度与透射谱线包络峰值位置对应关系即可。

### 3.2.2 强度探测方法

在强度探测方法下，输入光源由宽带光源和滤波器组成，图 2 中输出端 C 连接功率计（KEYSIGHT N7745A），用电脑软件控制 TEC 的温度并待其稳定后，记录功率计的功率值即可。在这里为了尽可能减小非温度变化对 C 端功率值的影响，在 A 端会连接一分二光纤，使从 A 端输出的功率一部分直接进入功率计中，一部分进入 B 端。记录不同温度时这两端的输出功率比值，就能完成强度探测。

## 3.3 实验验证过程

### 3.3.1 波长探测

调节 TEC 温度使其以 1°C 为温度梯度升温，在 25°C-30°C 时的 FPMRR 温度传感器透射谱线及对应包络如图 3 所示，对上包络进行了高斯拟合以确保较高的灵敏度拟合优度。

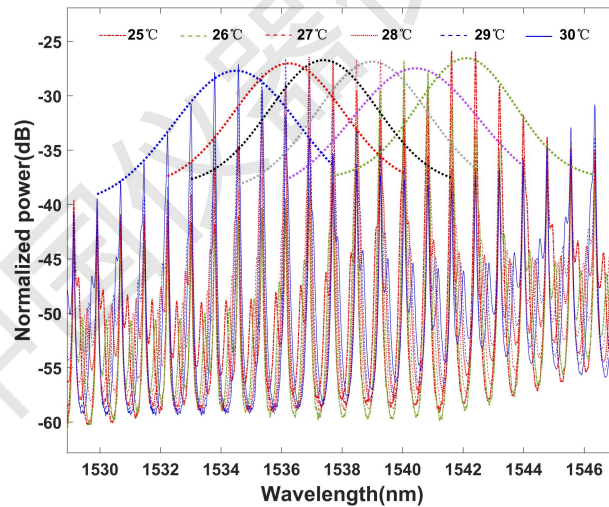


图 3 波长探测光谱扫描结果

不同温度与对应的光谱峰值波长位置数据点如图 4 所示，这种关系是线性的，并进行了直线拟合，拟合直线如图 4 中蓝色直线所示，斜率为 1.4903。波长探测灵敏度如公式（6）所示，因此 FPMRR 温度传感器波长探测灵敏度为 1.4903nm/°C。

$$S = \frac{\Delta\lambda_{envelope}}{\Delta T} \quad (6)$$

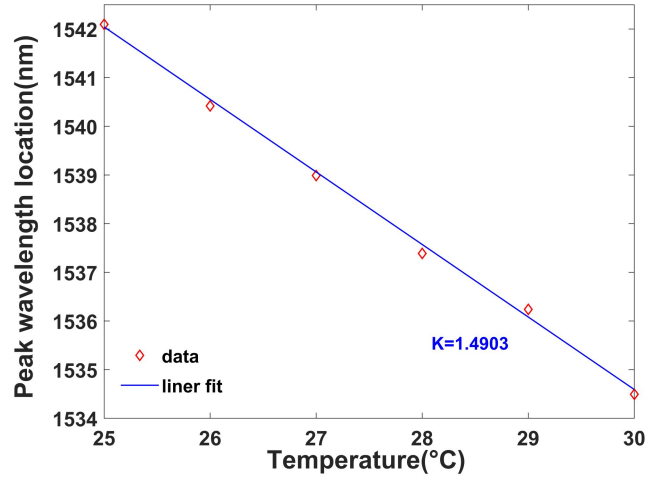


图 4 波长探测灵敏度拟合结果

实验所用的 FP 标准具的自由光谱范围为 800pm, MRR 的自由光谱范围为 848pm。根据公式 (5), FPMRR 的自由光谱范围为 17.7nm, 因为自由光谱范围等于探测范围与灵敏度之积, 所以 FPMRR 波长探测范围为 11.88°C。

探测极限 DL 如公式 (7) 所示, 其中  $\delta$  为标准差。

$$DL = \frac{3\delta}{S} \quad (7)$$

因此我们对 25°C 时的光谱扫描了 5 次, 将每次探测时的包络峰值记录与表 1 中, 可求波长探测探测极限为 0.0417°C。

表 1 25°C 时 5 次探测光谱峰值位置

实验次数	1	2	3	4	5
峰值波长位置 (nm)	1542.03	1542.01	1542.05	1542.02	1542.06

### 3.2.2 强度探测

组合输入光源的半高全宽为 4.5nm, 调节 TEC 温度使其以 0.5°C 为温度梯度升温, 如图 5 所示, 数据点为 20°C-26°C 时的 C 端输出功率与 A 端输出功率比值, 蓝色实线为对强度探测数据点多项式拟合所得, 在温度为 20°C-26°C, 拟合曲线的变化趋势近似为直线, 如图 5 所示, 近似的直线斜率为 1.5256, 这部分的温度区间长度就是强度探测范围, FPMRR 强度探测范围为 2°C。强度探测灵敏度定义为式 (8), 其中  $n_{eff}$  为 MRR 的有效折射率, PC、PA 分别为 C 端和 A 端的输出功率, 因此 FPMRR 强度探测灵敏度为 1.5256dB/°C。

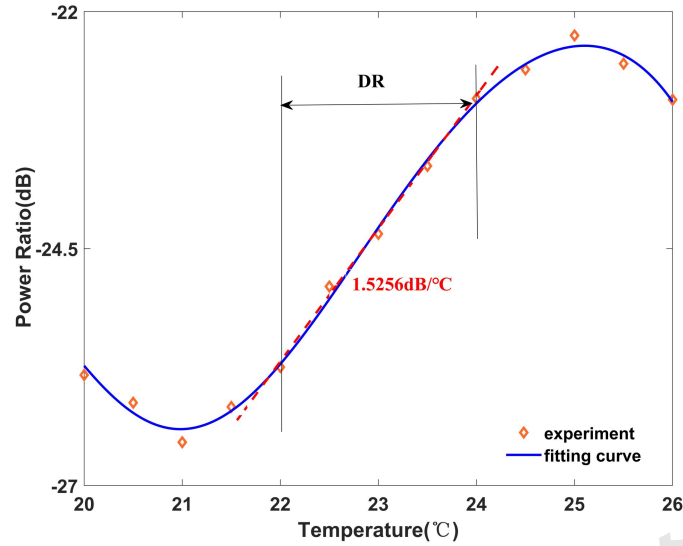


图5 强度探测结果

$$S_{\max} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T} \cdot \left[ \frac{\Delta(P_C / P_A)}{\Delta n_{\text{eff}}} \right]_{\max} \quad (8)$$

我们对 25°C 时的 C 端输出功率与 A 端输出功率比值重复测量了 5 次，将每次探测时结果记录与表 2 中，可求强度探测探测极限为 0.045°C。

表 2 25°C 时 5 次探测功率比

实验次数	1	2	3	4	5
功率比 (dB)	-22.258	-22.301	-22.276	-22.287	-22.243

参考文献:

- [1] Wang Yimeng, Shu Haowen, Han Xiuyou. Research on high-precision silicon-based integrated optical temperature sensor[J]. China Optics, 2021, 14(06): 1355-1361. (in Chinese)
- [2] Cong Hu, Yunying Shi, & Tian Zhou, Chuanpei Xu, Aijun Zhu. A Small Size On-chip Temperature Sensor Based on a Microring Resonator[J]. Silicon 2021.