

文章编号: 1002-2082(2010) 03-0495-04

# 聚合物材料并联双环型温度传感器的设计

陈 伟

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 利用聚合物材料折射率和温度变化之间的内在联系, 设计了一种并联双环温度传感器系统, 并数值模拟了以该模型为基础的聚合物材料并联双环型温度传感器。从输出的模拟波谱可以得到, 随着温度的变化, 输出光谱的谐振峰出现明显的位移, 对于热光系数较大的聚合物材料, 谐振峰的位移更加明显。温度升高  $1^{\circ}\text{C}$ , 谐振峰的位移为 32 nm。通过谐振峰的位移, 可以计算出温度的变化, 进一步提高测量温度的精确度。

**关键词:** 聚合物; 并联双环; 温度传感器

中图分类号: TN252

文献标志码: A

## Design of polymer parallel double-ring temperature sensor

CHEN Wei

(School of Mechanical Engineering; Jiangsu University; Zhenjiang 212013; China)

**Abstract:** A novel system of parallel double-ring temperature sensor is designed and numerical simulated, which is based on the relationship between the temperature and the refractive index of polymer. With the output of the simulation spectrum, the conclusion is achieved that the resonance peaks have distinct displacement as the temperature changes, and the higher thermo-optic coefficient of the polymer is, the more obvious resonance peaks shift. When the temperature increases by  $1^{\circ}\text{C}$ , the resonant peaks shift 32 nm. The temperature changes can also be calculated with the resonant peak shift, which provide the feasibility to improve the measurement accuracy of temperature.

**Key words:** polymer; parallel double-ring; temperature sensor

## 引言

传统的温度测量技术在各个领域的应用趋于成熟, 如热电偶、热敏电阻、光学高温计、半导体以及其他类型的温度传感器, 但他们的热敏特性是以电磁特性为基础的, 温度信号被电磁信号调制, 使测量范围和准确度都受到影响和限制。由于光波导本身的电绝缘性以及固有的宽频带、高灵敏度等优点, 使得光波导温度传感器突破了电调制的限制, 使测量范围和准确度大大提高。

从 1969 年 Marcatili<sup>[1]</sup> 提出谐振微环的概念以来, 由于其尺寸小, 结构紧凑, 损耗小和良好的波长

选择性等优点, 获得了广泛的应用, 如光信号处理、滤波、波分复用、路由、调制和开关等<sup>[2-5]</sup>。随着光微环技术的进步, 微环传感器由于其高灵敏度、低损耗及良好兼容性逐步被开发利用。在生物技术方面, 利用包层折射率的改变测量某些溶液的浓度, 也有文章将芯层改为液体进行传感。聚合物材料双环并联型微环温度传感器是利用输出光谱随温度变化的特性测量温度的, 传感器光源的特性决定了传感器测量的温度范围和灵敏度。

本文首先将微环结构改为圆角正方形, 并在此基础上将其芯层材料改为热系数较高的有机聚合

收稿日期: 2009-09-16; 修回日期: 2009-10-28

作者简介: 陈伟(1982-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事光无源器件的研究工作, E-mail: cwt418011@sohu.com

物。研究了不同聚合物材料下输出光谱的传播特性, 通过数值模拟, 得到不同温度下的输出光谱, 更精确的计算可以得到波峰的位移和温度变化之间的关系。

## 1 并联双环温度传感器

### 1.1 并联双环型温度传感器模型的设计

根据光波导的温度特性, 结合温度测量仪器的小型化、模块化和便携式的发展趋势, 设计了具有紧凑高效的光学系统与整体结构的聚合物材料双环并联型微环温度传感器系统, 总体设计如图 1 所示。采用反应离子刻蚀工艺, 将热光材料旋涂于硅基表面, 然后通过紫外曝光进行光刻, 制备如图 1 所示的波导结构, 激发光源发出的光经中心波长 1 550 nm 的光谱滤光可得到确定波长范围的光, 经光纤传输到有机聚合物材料。与无机材料相比, 有机聚合物材料具有低热导率和高热光系数。热光系数大则开光驱动功率小, 导热率低则开光速度小, 在 ms 数量级。同时聚合物材料成本低廉, 制作光波导的工艺简单。因此, 聚合物材料在温度传感器中具有重要的应用价值。在聚合物材料中, 有机硅树脂具有热稳定性高、抗老化和热光系数大等特点。经过遴选, 本文选用制作温度传感器的耐热型硅树脂材料<sup>[6]</sup>。

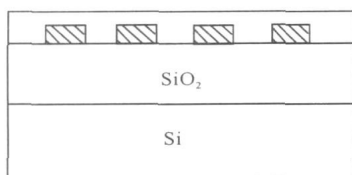


图 1 微环温度传感器模型

Fig. 1 Model of micro-ring temperature sensor

### 1.2 并联双环型温度传感器数值模拟方法

我们讨论的平行信道并联双环谐振滤波器的结构如图 2 所示, 由 2 个并联的微环和 2 条平行的信道组成。令微环四分之一圆的半径为  $R$ , 微环中

的直道长度为  $S$ , 信道长为  $2L_1 + L_2$ , 其中  $L_1$  为信道端口到与其临近耦合点的距离,  $L_2$  为同一信道上两耦合点间的距离。微环与信道的模式传播常数相等 (皆为  $\beta$ ), 微环波导信道波导模的复传播常数为  $\beta - j\alpha_R$ ,  $\beta - j\alpha$ , 其中  $\alpha_R$  为弯道的传播损耗系数,  $\alpha$  为直道的传播损耗系数。

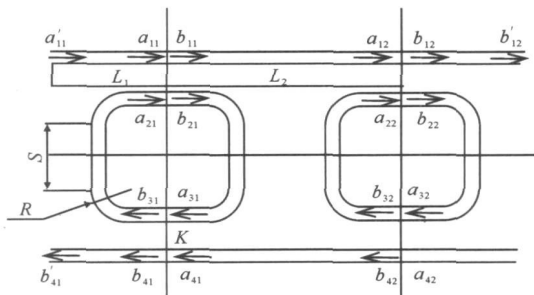


图 2 双环并联型微环结构图

Fig. 2 Structure of parallel double-ring waveguides

根据耦合模理论及传输矩阵理论, 对于第 1 个环, 利用  $a_{41} = b_{42} \exp(-j\Psi_2)$  得:

$$b_{11} = Ua_{11} + Va_{41} = Ua_{11} + Vb_{42} \exp(-j\Psi_2) \quad (1a)$$

$$b_{41} = Ua_{11} + Va_{41} = Va_{11} + Ub_{42} \exp(-j\Psi_2) \quad (1b)$$

式中  $\Psi_2 = L_2(\beta - j\alpha)$ , 其中  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$ 。

对于第 2 个环, 利用  $a_{42} = 0$ ,  $a_{12} = b_{11} \times \exp(-j\Psi_2)$ , 得到:

$$b_{12} = Ua_{12} = Ub_{11} \exp(-j\Psi_2) \quad (2a)$$

$$b_{42} = Va_{12} = Vb_{11} \exp(-j\Psi_2) \quad (2b)$$

式中:

$$U = \frac{t[1 - \exp(-j2\varphi)]}{1 - t^2 \exp(-j2\varphi)} \quad (3a)$$

$$V = \frac{K^2 \exp(-j\varphi)}{1 - t^2 \exp(-j2\varphi)} \quad (3b)$$

式中  $\varphi = \pi R(\beta - j\alpha_R) + 2S(\beta - j\alpha)$ 。

因此, 由 (14) ~ (16) 式可得到由上信道输入端口至输出端口的光强传递函数  $|B|^2$  和由上信道输入端口至下信道输出端口的光强传递函数  $|D|^2$ , 分别为

$$|B|^2 = \left| \frac{b_{41}}{a_{11}} \right| = \left| \frac{b_{12} \exp(-j2\Psi_1)}{a_{11}} \right| = \left| \frac{U^2 \exp[-j(2\Psi_1 + \Psi_2)]}{1 - V^2 \exp(-j2\Psi_2)} \right| \quad (4a)$$

$$|D|^2 = \left| \frac{b_{41}}{a_{11}} \right| = \left| \frac{b_{41}}{a_{11}} \exp(-j2\Psi_1) \right| = \left| \frac{V[1 + (U^2 - V^2) \exp(-j2\Psi_2) \exp(-j2\Psi_1)]}{1 - V^2 \exp(-j2\Psi_2)} \right| \quad (4b)$$

式中  $\Psi_1 = L_1(\beta - j\alpha)$ 。

则下信道传输光谱定义为

$$T = 10 \lg(|D(\lambda)|^2) \quad (5)$$

一般地, 聚合物材料的折射率和温度的变化关系可表示为  $n = -\alpha \times 10^{-4} t + \gamma$ , 其中  $\alpha$  为热光系数, 它的大小与所用材料有关, 其值在 2.5 ~ 4.5 之间,

$\gamma$ 与材料的配比有关。

由导波光学的相关知识, 我们知道有效折射率  $n_{\text{eff}}$  是芯层折射率  $n$  的函数, 令  $n_{\text{eff}} = f(n)^{[7]}$ , 并代入

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$ 。则有:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} f(n) \quad (6)$$

由于  $n$  是温度  $T$  的函数, 因此  $\beta$  可以表示成:

$$\beta = g(t) \quad (7)$$

由此下信道传输光谱  $T$  可以表示成:

$$T(\lambda, t) = 10 \lg(|D(\lambda, t)|^2) \quad (8)$$

## 2 模拟结果与讨论

数值模拟中圆角正方形模型并联双环的结构参数列于表 1 中。

表 1 圆角正方形结构参数

Table 1 The parameters of the fillet square waveguides

参数	数值
中心波长	$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$
包层折射率	$n_2 = 1.45$
谐振级数	$m = 78$
微环角圆半径	$R = 6 \mu\text{m}$
微环直道长	$S = \pi R$
微环波导芯厚度	$b = 1.5 \mu\text{m}$
间距	$L_1 = 4000 \mu\text{m}$
直道损耗系数	$L = 0.25 \text{ dB/cm}$
弯道损耗系数	$R = 0.5 \text{ dB/cm}$

为了显示不同温度下的输出光谱, 我们模拟了聚合物材料硅树脂的输出谱, 对于硅树脂,  $\alpha = 3.6$ ,  $\gamma = 1.5349$ , 折射率和温度的变化关系  $n = -3.6 \times 10^{-4}t + 1.5349$ , 根据(8)式, 我们模拟了温度 20 和 30 时信道传输光谱。图 3 为中心波长 1.55  $\mu\text{m}$ , 左右 0.002  $\mu\text{m}$  范围内的输出光谱, 其中两者

的振幅耦合比率都为 0.3。

从图 3 可看出, 虽然在不同的温度下输出光谱的 FSR 没有改变, 但谐振峰发生了位移, 随着温度的变化, 谐振峰开始向左移动, 这样就可以通过输出光谱谐振峰位移的变化来反映温度的变化。谐振峰的微小位移, 可以通过图像准确计算出, 这就为进一步提高测量温度的精确度提供了可行性。同时由于光波导具有抗电磁干扰和非接触等优点, 使该温度传感器具有更广泛的用途。

图 4 给出了聚合物材料为聚酰亚胺在不同温度下的输出光谱。对于聚酰亚胺, 其折射率和温度的变化关系可表示为  $n = -2.40571 \times 10^{-4}t + 1.49892^{[8]}$ , 从图中可以看到谐振峰的位移没有硅树脂那样明显, 为了清晰显示不同聚合物材料下谐振峰的位移, 我们模拟了温度由 20 上升到 30 时, 聚酰亚胺和硅树脂谐振峰分别发生的位移, 如图 5 所示。从图中可以知道, 由于硅树脂具有较高的热光系数, 它的折射率随温度的变化较大, 这就启发我们可以用不同的聚合物热光材料作为芯层

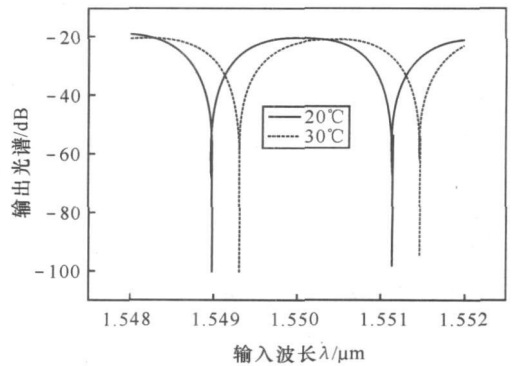


图 4 聚酰亚胺在不同温度下的输出光谱

Fig. 4 Transmission spectrums of polyimide at different temperatures

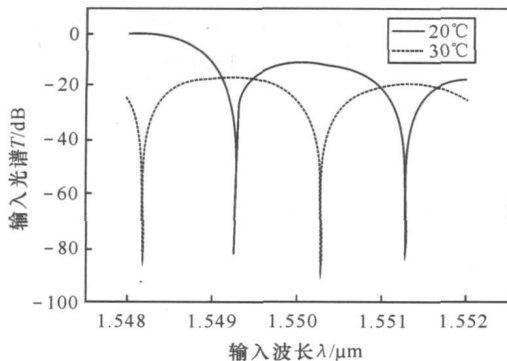


图 3 硅树脂在不同温度下的输出光谱

Fig. 3 Transmission spectrums of Silicon resin at different temperatures

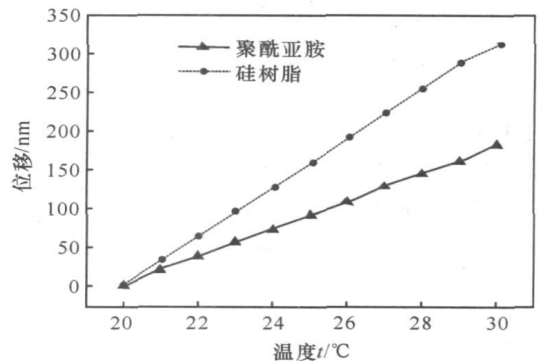


图 5 不同材料位移随温度的变化

Fig. 5 Displacement dependence on temperatures

材料来测量各种温度间隔范围内的温度, 且具有不同的灵敏度。

### 3 结论

本文介绍了一种新的温度传感器, 针对圆角正方形微环结构, 在波导芯层引入热光材料, 根据耦合模理论, 模拟分析圆角正方形波导组成的并联双环模型的输出光谱特性, 发现随着波导芯层温度的变化, 谐振峰也出现明显的位移。进一步研究发现, 谐振峰位移的变化和温度呈线性关系, 这样就可以通过位移的变化准确测定温度的变化。

#### 参考文献:

- [1] REZZONICO D, GUARINO A, HERZOG C, et al. High-finesse laterally coupled organic-inorganic hybrid polymer micro-ring resonators for VLSI photonics[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(7): 865-867.
- [2] TAZAWA H, STEIER W H. Linearity of ring resonator-based electro-optic polymer modulator[J]. Electron. Lett., 2005, 41(23): 55-56.
- [3] ZHOU Jun, PYAYT A, DALTON L R, et al. Photobleaching fabrication of microring resonator in a chromophore-containing polymer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(21): 2221-2223.
- [4] PYAYT A, ZHOU Jun, CHEN An-tao, et al. Electro-optic polymer microring resonators made by photobleaching[J]. SPIE, 2007, 6470: 64700Y 1-64700Y 7.
- [5] MA Chun-sheng, WANG Xian-yin, LI De-lu, et al. Characteristic analysis of series-cascaded microring resonator arrays[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(6): 1183-1188.
- [6] 张小康, 廖常俊. 硅树脂材料热光特性的测试与分析[J]. 光学学报, 2005, 25(5): 629-632.
- ZHANG Xiao-kang, LIAO Chang-jun. The test and analysis for thermo-optic effect of silicon resin[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(5): 629-632. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 柯尊淦, 吴少平, 郑丹. 电磁波在负折射率材料填充三层平板波导中的传播特性[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 825-829.
- KE Zun-gan, WU Shao-ping, ZHENG Dan. Propagation characteristics of electromagnetic wave in slab waveguide filled with negative refraction index material[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(9): 825-829. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 蒋艳, 邱凤仙. 有机聚合物 BPDA-ODA-DR1 的合成及热光性能的研究[J]. 光电子激光, 2006, 17(12): 1492-1496.
- JIANG Yan, QIU Feng-xian. Synthesis and study of thermal-optical properties based on the organic polymer BPDA-ODA-DR1 [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2006, 17(12): 1492-1496. (in Chinese with an English abstract)
- Appl. Phys. Lett., 2000, 76(2): 197-199.
- [25] CHEN S F, WANG C W. Influence of the hole injection layer on the luminescent performance of organic light-emitting diodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85(5): 765-767.
- [26] ADACHI C, BALDO M A, FOMEST S R. Electroluminescence mechanisms in organic light emitting devices employing a europium chelate doped in a wide energy gap bipolar conducting host [J]. J. Appl. Phys., 2000, 87(11): 8049-8055.
- [27] MATSUSHIMA T, KINOSHITA Y, MURATA A H. Formation of Ohmic hole injection by inserting an ultrathin layer of molybdenum trioxide between indium tin oxide and organic hole-transporting layers [J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(25): 253504-253506.

(上接第 494 页)