

基于U型波导耦合单微环结构的高灵敏度湿度传感器

李志全¹, 王禄娜¹, 李欣², 张鑫¹

1. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

2. 哈尔滨工业大学控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 首次提出了一种基于U型波导耦合的新型单微环结构湿度传感器, 该传感器以聚酰亚胺(polyimide, PI)作为感湿材料, 当外界环境相对湿度变化时, 引起感湿部位折射率的相应变化, 导致传感器的输出光谱发生漂移。根据传输矩阵法推导U型波导耦合单微环结构的传递函数, 重点讨论了不同感湿部位对输出光谱的影响, 通过Matlab理论仿真, 确定以U型波导耦合单微环结构整体作为最佳感湿部位。当U型波导的两个耦合点间的距离为微环周长的整数倍时, 相比于传统的单微环结构, 自由光谱范围(FSR)实现加倍。外界相对湿度从10%RH变化到100%RH时, 传感器的输出光谱漂移量在 $0.027 \sim 0.191 \mu\text{m}$ 之间变化, 灵敏度高达 $0.0018 \mu\text{m}/\% \text{RH}$, 相比于具有高灵敏度的光纤光栅类湿度传感器, 灵敏度提高了10~100倍, 实现了在高灵敏度感湿的同时兼顾谐振峰两侧大范围的滤波选频。

关键词 U型波导耦合单微环结构; 传输矩阵法; 湿度传感器; 灵敏度; FSR

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)02-0563-05

引言

湿度对于人类的生存有着重要意义。近年来, 国内外在工业, 农业, 气象, 军事, 建筑以及医疗等方面对湿度的检测, 控制和报警提出了越来越高的要求。与重力型、电容型、电阻型、压阻型等湿度传感器相比, 光学湿度传感器在灵敏度, 稳定性, 制造工艺等方面性能突出, 能够实现很高的测量精度, 尤其是以聚酰亚胺作为新兴的光波导感湿材料, 通过旋涂和亚胺化热处理技术可获得耐湿热, 无毒, 膨胀系数低, 化学性能稳定的 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 厚的薄膜, 因而广泛应用在微型湿度传感器中。

微型光学湿度传感器的研究在不断深化探索, 在高灵敏度方面, Huang等以聚酰亚胺为感湿材料, 提出基于光纤布拉格光栅(FBG)的湿度传感器, 灵敏度为 $10 \text{ pm}/\% \text{RH}$ ^[1]; Lourdes Alwis等以聚酰亚胺为感湿材料, 提出基于长周期光纤光栅(LPG)的湿度传感器的灵敏度为 $100 \text{ pm}/\% \text{RH}$ ^[2]。

微环谐振器是Marcatili提出的, 它在滤波^[3]、延时^[4]、激光器^[5]领域应用广泛, 近年来, 微环作为传感器在测量温度^[6]、气体浓度^[7]、加速度^[8]、压力^[9]等方面性能优异, 但微环作为湿度传感器的报道却很少。

本文首次提出了一种基于U型波导耦合的新型单微环结构湿度传感器, 该传感器以聚酰亚胺作为感湿材料。根据聚酰亚胺折射率和相对湿度变化之间的内在联系, 优化设计结构参数, 当外界环境相对湿度从10%RH变化到100%RH时, 漂移量 $\Delta\lambda_m$ 在 $0.027 \sim 0.191 \mu\text{m}$ 之间变化, 灵敏度高达 $0.0018 \mu\text{m}/\% \text{RH}$ 。

1 理论分析

1.1 U型波导耦合单微环结构的传递函数

图1(a)为U型波导耦合单微环结构, 图1(b)为条状感湿波导的横截面。 n_{eff} 代表介质的有效折射率, E_i 代表各个端口的光场复振幅, $I_i = |E_i|^2$ (i 代表 a, b, c, d), 其中 I_i 为对应的光场强度。在耦合区1处, 微环与直波导之间的耦合系数和传输系数分别为 k_1, t_1 , 在耦合区2处, 微环与波导之间的耦合系数和传输系数分别为 k_2, t_2 , 且两耦合区均满足 $k^2 + t^2 = 1$ (不考虑耦合损耗时)。 τ 和 τ_1 分别代表光在微环内传输一周和在U型波导内传输距离为 L_1 时的传输系数, 满足 $\tau = \exp(-\alpha L)$, $\tau_1 = \exp(-\alpha L_1)$, α 是损耗系数, L 是微环周长, $L = 2\pi R$, R 是微环半径, L_1 是U型波导的两个耦合点间的距离; p 代表光在微环内传输半周时的相位因子, p_1 代表光沿着U型波导在两耦合点传输距离为 L_1 的相

收稿日期: 2013-10-10, 修订日期: 2014-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(60877047, 61172044)和河北省自然科学基金项目(F20100002002)资助

作者简介: 李志全, 1954年生, 燕山大学电气工程学院教授 e-mail: lzq54@ysu.edu.cn

位因子, 满足 $p = \exp(i\phi)$, $p_1 = \exp(i\phi_1)$, ϕ 是光在微环内传输半周时的相位变化, ϕ_1 是传输距离 L_1 后的相位变化, 且 $\phi = \beta L/2$, $\phi_1 = \beta L_1$, β 为传播常数。

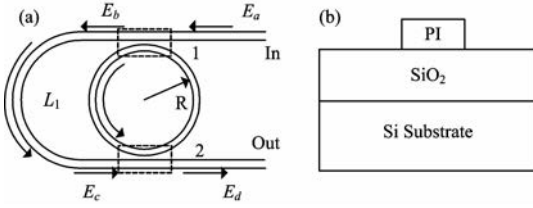


Fig. 1 (a) Structure of U-shaped waveguide-coupled single micro-ring; (b) The cross section of humidity sensing waveguide

设耦合区 1 处, 2 处, 微环间的传输矩阵以及微环的总传输矩阵分别为 M_1 , M_2 , M_t , M , 则 $M = M_2 \cdot M_t \cdot M_1$ 。其中

$$M_1 = \begin{bmatrix} -t_1 & 1 \\ ik_1 & ik_1 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} -t_2 & 1 \\ ik_2 & ik_2 \end{bmatrix},$$

$$M_t = \begin{bmatrix} 0 & \tau^{\frac{1}{2}} p \\ (\tau^{\frac{1}{2}} p)^{-1} & 0 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$

输出光谱强度传输函数为^[10]

$$D = \frac{I_d}{I_a} = \frac{|E_d|^2 + |E_f|^2 + 2|E_d||E_f|\cos(\delta)}{|E_a|^2} \quad (1)$$

其中:

$$E_d = \left(M_{21} - \frac{M_{11}M_{22}}{M_{12}} \right) E_a; E_f = \frac{-\tau_1 p_1 M_{11} M_{22}}{M_{12} (M_{12} - \tau_1 p_1)} E_a;$$

$$\delta = \pi + \phi - \phi_1 - \arctan \frac{t_1 \tau \sin(2\phi)}{t_1 \tau \cos(2\phi) - t_2} +$$

$$\arctan \frac{\tau_1 \tau^{1/2} k_1 k_2 \sin(\phi + \phi_1) - t_1 t_2 \tau \sin(2\phi)}{1 + \tau_1 \tau^{1/2} k_1 k_2 \cos(\phi + \phi_1) - t_1 t_2 \tau \cos(2\phi)} -$$

$$\arctan \frac{t_2 \tau \sin(2\phi)}{t_2 \tau \cos(2\phi) - t_1}$$

1.2 相对湿度

某温度下, 混合气体中水蒸气压 e 与饱和蒸气压 e_s 之比, 称为相对湿度, 其表示式为

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100\% \quad (2)$$

1.3 聚酰亚胺的相对湿度与介电常数关系

当外界环境中相对湿度发生变化时, 感湿介质吸附空气中的水汽分子, 其介电常数随吸附的水汽含量的变化而变化。吸湿后复合物的介电常数为 ϵ , 聚酰亚胺和水的介电常数分别为 ϵ_1 和 ϵ_2 , 聚酰亚胺吸水百分比为 γ , 根据 Looyenga 经验公式^[10], 它们的关系为

$$\epsilon = [\gamma(\epsilon_2^{\frac{1}{3}} - \epsilon_1^{\frac{1}{3}}) + \epsilon_1^{\frac{1}{3}}]^3 \quad (3)$$

其中

$$\gamma = \gamma_m \phi(t) x^{\beta(t)} \quad (4)$$

式中 x 为外界环境的相对湿度, $\phi(t)$ 与 $\beta(t)$ 可表述为

$$\phi(t) = 1 - (T - T_0) \quad (5)$$

式中, $\gamma_m = 10 \times 10^{-2}$, $T_0 = 298$ K, $a_0 = 2.43 \times 10^{-3}$, $a_1 =$

2.22×10^{-4} , $a_2 = 2.34 \times 10^{-5}$, $\beta_1 = 4.9 \times 10^{-3}$, $\beta_2 = -0.12$, $\phi_0 = 0.836$ 。

聚酰亚胺吸湿后复合物的折射率 n 与介电常数 ϵ 的关系如下

$$\epsilon \approx n^2 \quad (6)$$

图 1(b) 中 n_1 , n_2 和 n_3 分别为 PI, SiO₂ 和空气覆盖层的折射率, 选择合适的入射角同时满足 $n_3 < n_2 < n_1$, 满足光在波导层传输时的全反射条件, 则聚酰亚胺吸湿后波导有效折射率 n_{eff} 与复合物的折射率 n 的关系如下

$$n_{\text{eff}} \approx n \quad (7)$$

室温下(25 °C), 聚酰亚胺膜厚约为 3 μm 时, 损耗系数约为 0.326 dB · cm⁻¹, 折射率约为 1.6, 对应的介电常数约为 2.56。

2 仿真与分析

2.1 相对湿度与有效折射率

当外界环境的相对湿度为 0, 根据式(3)一式(7), 此时 $\epsilon = \epsilon_1 = 2.56$, $n_{\text{eff}} \approx n \approx 1.6$ 。已知水的介电常数为 78.36, 通过 Matlab 仿真发现外界环境的相对湿度与吸湿后波导有效折射率基本呈线性关系, 如图 2 所示, $n_{\text{eff}} = 0.0019 \times RH + 0.6091$ 。

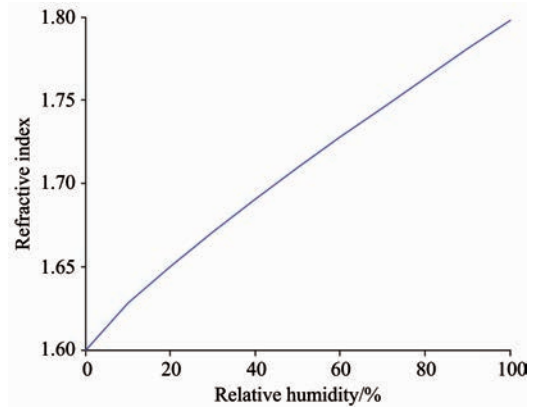


Fig. 2 The relationship between RH and n_{eff}

2.2 感湿部位的选择

2.2.1 U 型波导单独作为感湿部位

选择 U 型波导单独作为感湿部位, 图 3(a), (b), (c), (d) 分别为相对湿度为 10% RH, 50% RH, 70% RH, 100% RH 时, $L_1 = 2L$, $L_1 = 2.5L$, $L_1 = 3L$ 的三种情况下的输出光谱。

从图 3(a)一(d)中可以看出, 若单独选择 U 型波导为感湿部位, L_1 的大小以及相对湿度的改变几乎都不能引起谐振峰的变化, 从而不会产生输出光谱的水平漂移, 所以 U 型波导不能单独作为感湿部位。

2.2.2 微环单独作为感湿部位

选择微环单独作为感湿部位, 图 4(a)一(d)分别为相对湿度为 10% RH, 50% RH, 70% RH, 100% RH 时, $L_1 = 2L$, $L_1 = 2.5L$, $L_1 = 3L$ 的三种情况下的输出光谱。图 5 为 $L_1 =$

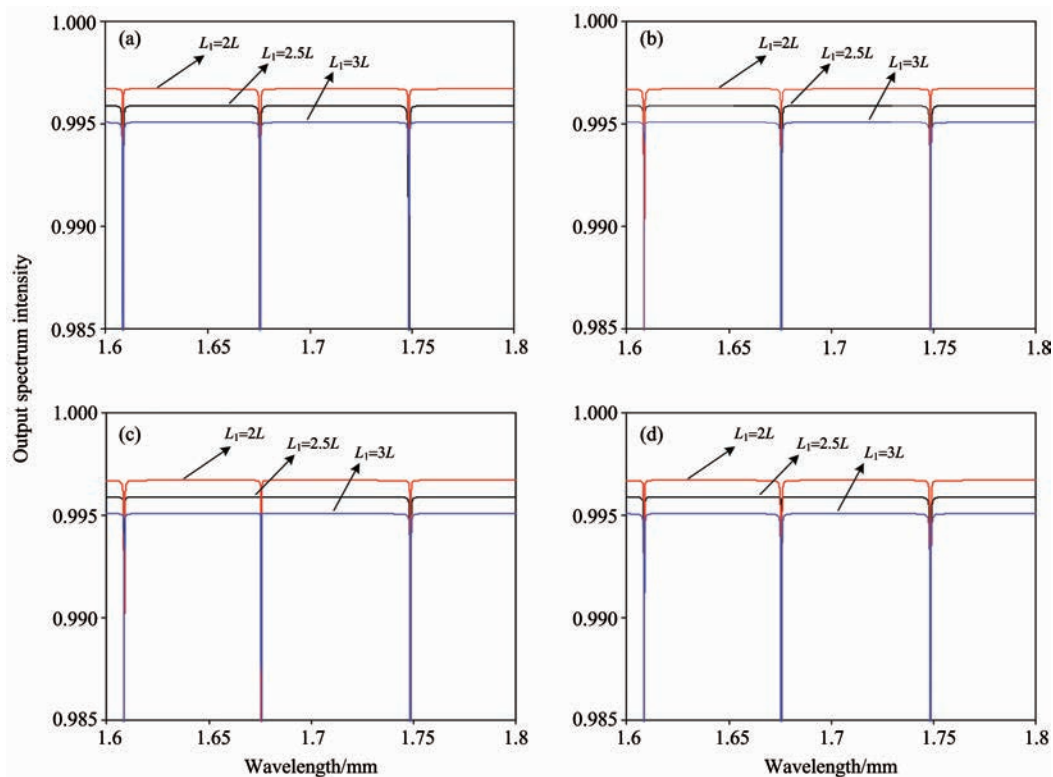


Fig. 3 The output spectrum intensity with different relative humidity

(a): 10%RH; (b): 50%RH; (c): 70%RH; (d): 100%RH

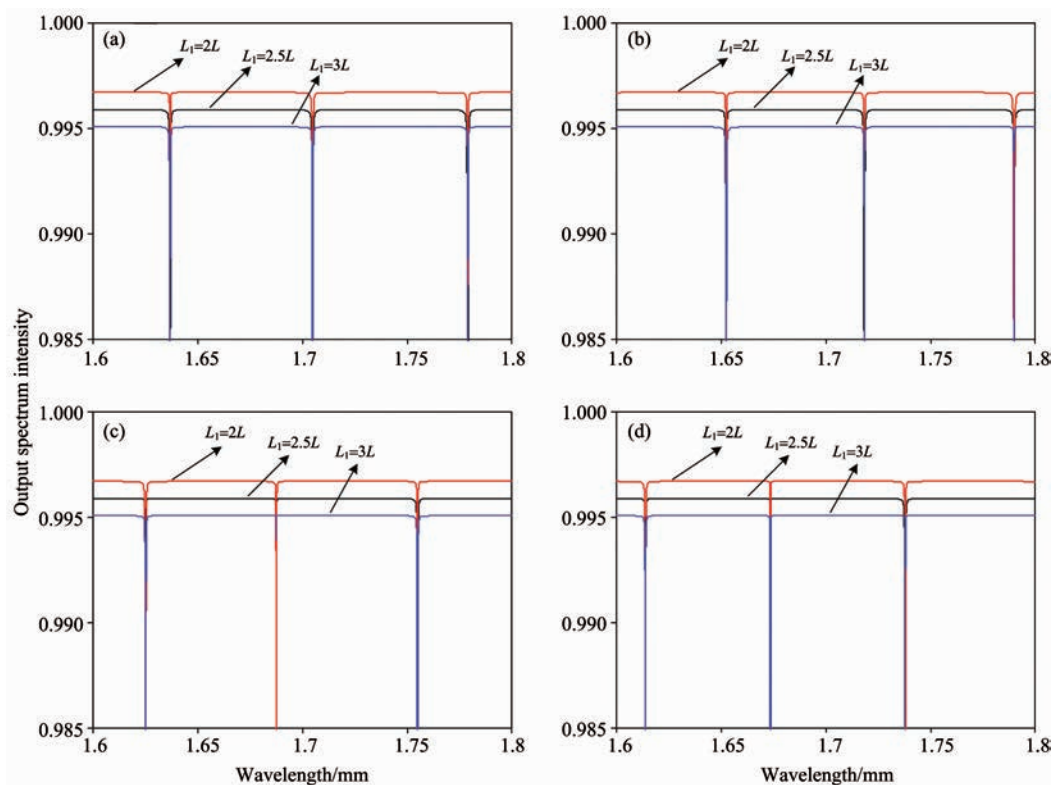


Fig. 4 The output spectrum intensity with different relative humidity

(a): 10%RH; (b): 50%RH; (c): 70%RH; (d): 100%RH

2L 时 10%RH, 20%RH 下的输出光谱。

从图 4(a)–(d)中可以看出, 若单独选择微环作为感湿部位, 相对湿度不变时, L_1 的改变不能引起谐振峰的变化, 从而没有产生输出光谱的水平漂移; L_1 不变时, 相对湿度的改变引起谐振峰的变化, 从而导致输出光谱的水平漂移。

以 $L_1=2L$ 为例, 从图 5 可以看出, 相对湿度从 10%RH 变化到 20%RH 时, 输出光谱产生显著漂移, 但消光效果仍然很差, 所以微环单独作为感湿部位时不能同时兼顾良好的滤波选频。

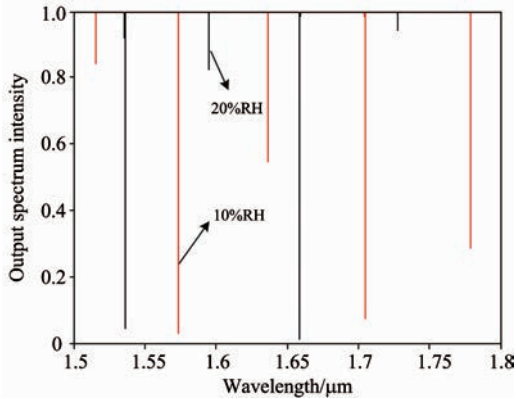


Fig. 5 The output spectrum intensity with two different humidity when $L_1=2L$

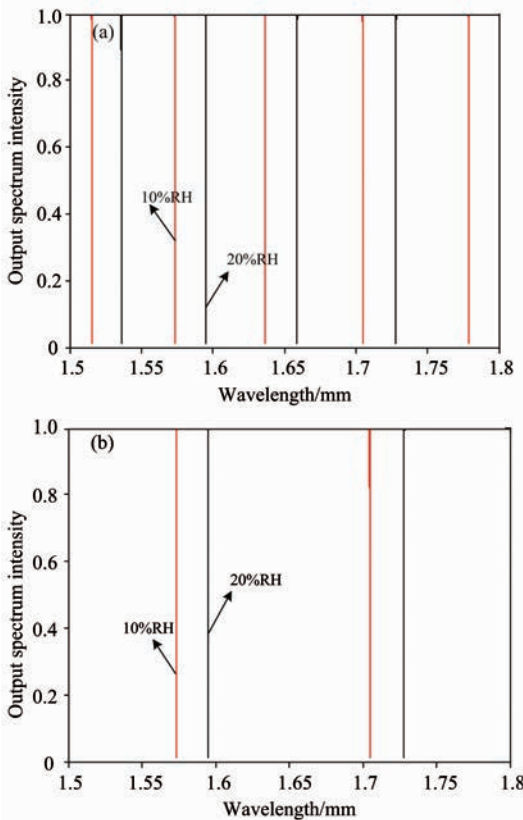


Fig. 6 The output spectrum intensity with two different L_1
(a): $L_1=2.5L$; (b): $L_1=2L$

2.2.3 U 型波导耦合单微环结构整体作为感湿部位

选择 U 型波导耦合单微环结构整体作为感湿部位, 图 6(a)和图 6(b)分别为 $L_1=2.5L$, $L_1=2L$ 时 2 种相对湿度条件下的输出光谱。

与传统单微环结构相比, L_1 是 L 的整数倍的条件下能够实现 FSR 加倍^[10]。相比于图 6(a), 图 6(b)中 $L_1=2L$, 满足此加倍条件, 因此实现了 FSR 加倍。相比于单独以 U 型波导和微环为感湿部位, 在图 6(b)中, 整体感湿且 L_1 为 L 的整数倍时, 输出光谱实现了良好的消光, 具有明显的输出光谱漂移。表 1 为室温下, 以 U 型波导耦合单微环结构整体感湿且 L_1 为 L 的整数倍时, 外界相对湿度与其他参数的关系。

Table 1 Corresponding relation between
RH and other parameters

相对湿度 RH/%	介电常数 ϵ	有效折射率 n_{eff}	谐振波长水平漂 移量 $\lambda_m/\mu\text{m}$
10	2.650 0	1.627 9	0.027 0
20	2.723 0	1.650 1	0.048 0
30	2.791 3	1.670 7	0.068 0
40	2.857 2	1.690 3	0.087 0
50	2.921 5	1.709 2	0.105 0
60	2.984 7	1.727 6	0.123 0
70	3.047 1	1.745 6	0.140 0
80	3.109 0	1.763 2	0.157 0
90	3.170 4	1.780 6	0.174 0
100	3.231 6	1.797 7	0.191 0

微环湿度传感器灵敏度 S 定义为

$$S = \frac{\Delta\lambda_m}{\Delta\text{RH}} \quad (8)$$

从图 7 中可以看出, 相对湿度与谐振波长漂移量基本呈线性关系, 通过 Matlab 拟合得到两者关系

$$\lambda_m = 0.0018 \times \text{RH} + 0.0127$$

通过式(8)可知微环湿度传感器灵敏度 $S=0.0018 \mu\text{m}/\% \text{RH}$ 。

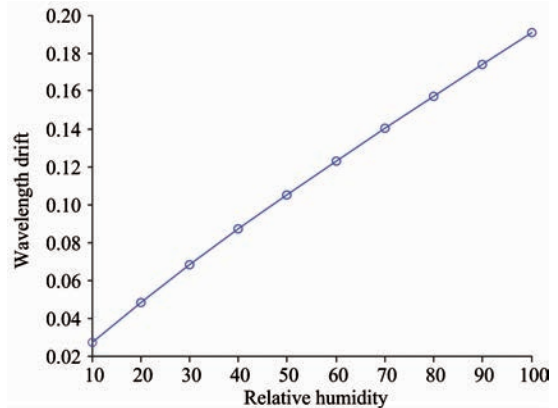


Fig. 7 The relationship between relative humidity
and resonant wavelength drift

3 结 论

基于U型波导耦合单微环结构,聚酰亚胺薄膜作为感湿材料,通过选取不同的感湿部位进行输出光谱的理论仿真,最终确定U型波导耦合单微环结构整体作为最佳感湿部位,该传感器灵敏度高达 $0.0018\ \mu\text{m}/\%\text{RH}$,且 L_1 为 L 的整数

倍时,FSR加倍。相比于具有高灵敏度的光纤光栅类湿度传感器,灵敏度提高了10~100倍,实现了在高灵敏度感湿的同时兼顾谐振峰两侧大范围的滤波选频。在制作的过程中可以通过改善聚酰亚胺成膜工艺和降低外界干扰等方法减小加工误差和系统误差,从而保持较高的灵敏度。这种集成度高,反应灵敏,线性度好的微环湿度传感器将发挥重要作用。

References

- [1] Huang X F, Sheng D R, Cen K F, et al. *Sensors Actuat.*, 2007, 127(2): 518.
- [2] Lourdes Alwis, Tong Sun, Kenneth V Grattan. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(2): 767.
- [3] ZHANG Bin, MAO Lu-hong, XIE Sheng, et al(张彬,毛陆虹,谢生,等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2010, 30(2): 537.
- [4] Li Q, Liu F, Zhang Z, et al. *J. Lightw. Technol.*, 2008, 26(23): 3744.
- [5] Liang D, Fiorentino M, Srinivasan S, et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(6): 1528.
- [6] Deng Honggui, Yang Bingchu, Chen Zhou, et al. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012, (7): 8205.
- [7] Mo Wenqin, Wu Huaming, Gao Dingshan, et al. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(9): 798.
- [8] Bhola B, Steier W H. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(12): 1759.
- [9] LI Zhi-quan, LI Xiao-yun, SUN Yu-chao, et al(李志全,李晓云,孙宇超,等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2012, 32(7): 0723001.
- [10] Shibata H, Ito M, Asakura M, et al. *Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2): 564.

A High Sensitivity Micro-Ring Humidity Sensor Based on U-Shaped Waveguide Coupled Single Micro-Ring Structure

LI Zhi-quan¹, WANG Lu-na¹, LI Xin², ZHANG Xin¹

1. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China

2. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China

Abstract The paper proposes a novel high sensitivity humidity sensor based on a U-shaped waveguide-coupled single micro-ring. Polyimide is used as the wet material, the refractive index of humidity-sensing part changes as relative humidity changes, thus leading to a obvious peak drift. The transfer function of the structure is derived basing on transfer matrix method and the paper mainly discusses the influence on the output spectrum with different humidity-sensing parts. Through the theoretical simulation of Matlab, the whole structure of U-shaped waveguide coupled single micro-ring is proved to be the best humidity-sensing part. The free spectral range (FSR) will be doubled compared to the traditional single micro ring structure while the length between the two coupling points of the U-shaped waveguide is an integer multiple of circumference of the micro-ring. When the relative humidity of external environment changes from 10%RH to 100%RH, the output spectrum appears a obvious drift from 0.027 to $0.191\ \mu\text{m}$ and the sensitivity reaches up to $0.0018\ \mu\text{m}/\%\text{RH}$. Compared to FBG humidity sensor with high sensitivity, the sensitivity in this article is increased by 10 to 100 times, achieving a high sensitivity in the sense of humidity when the wide range of filter frequency selection is taken into account.

Keywords U-shaped waveguide-coupled single micro-ring structure; Transfer matrix method; Humidity sensor; Sensitivity; FSR

(Received Oct. 10, 2013; accepted Jan. 25, 2014)