

# 微光纤环形谐振腔微电光效应的研究

饶云江, 邓强, 易玮琪, 吴宇, 陈一槐

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**对氧化硅微光纤环形谐振腔的电光效应进行了研究, 分析了微电流调制下微光纤环形谐振腔输出光谱的特性。实验结果表明, 在微电流调制下由电光效应引起的微环谐振腔输出谐振波长漂移的灵敏度为 $\sim 500$  pm/A, 通过使用光纤光栅, 实验测得由金属导线热效应引起的谐振峰漂移量远小于电流调制引起的谐振峰漂移。该微光纤环形谐振腔由于品质因素高、体积小、成本低, 因此在发展电光调制的光纤在线滤波器及MEMS器件的微电流测量方面具有潜在的研究价值。

**关键词** 电光效应; 微电流测量; 微光纤; 光纤谐振腔; 可调谐滤波器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.01.008

## Study on Electro-Optic Effect of Microfiber Knot Resonator

RAO Yun-jiang, DENG Qiang, YI Wei-qi, WU Yu, and CHEN Yi-huai

(Key Laboratory of Ministry of Education for Optical Fiber Sensing and Communication,

University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The electro-optic effect of a silica microfiber knot resonator (MKR) is studied. The characteristic of output optical spectrum is analyzed theoretically and experimentally. The experimental results show that the current sensitivity due to electro-optic effect is  $\sim 500$  pm/A. The wavelength shift due to the thermal drift of the wire is much smaller than that caused by the electro-optic effect. Such MKR has the advantages of high Q factor, compact size and low cost and therefore has potential value in developing tunable in-line fiber-optic filters and micro-current measurement for MEMS devices.

**Key words** electro-optic effect; micro-current measurement; microfiber; microfiber knot resonator; tunable filters

微光学谐振腔作为集成光学的一个重要研究方向, 在光波长复用器、光波长解复用器、光交换和滤波器件方面有很大的发展。自利用LiNbO<sub>3</sub>掺Ti元素、制作电光调制谐振腔以来, 对基于半导体GaAs和GaInAsP/InP的微型谐振腔也展开了研究<sup>[1-2]</sup>, 如其中的文献[1]报道利用红外光调制的InGaAsP/InP微型谐振腔, 取得了3 nm的峰值漂移。但在波导上进行光刻蚀制作的工艺和成本要求较高, 而由亚波长直径光纤构成的环形谐振腔结构, 由于有较高的品质因素, 较低的传输损耗、弯曲损耗和高消光比, 以及制备方法简单, 成本较低等优势, 在微光纤传感、光子器件等领域有着较大的研究价值和应用潜力<sup>[3-4]</sup>。本文对微小电流调制下微光纤环型结构的电光效应进行研究, 分析了微光纤环形谐振腔输出光谱特性和谐振波长漂移随调制电流强度变化的关系。

## 1 原理

本文研究的微光纤是通过普通单模光纤在高温加热条件下拉制而成的。微光纤中传输的光以倏逝波形式在光纤表面近场区域内传播。在微光纤环型结构的交叠区, 微光纤以自耦合的方式形成环形谐振腔。当微光纤环的耦合系数较大时, 光可以在环形腔中循环耦合并形成光程差, 从而输出谐振透射光谱。由于光依靠倏逝波的形式在微光纤表面传输, 使得光波有机会与周围的介质相互作用, 从而改变微光纤环中光的传输特性<sup>[3-4]</sup>。

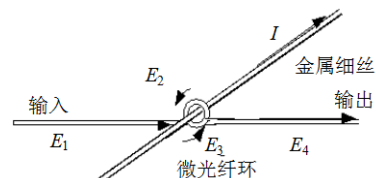


图1 微光纤环形谐振腔物理模型示意图

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-04-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60537040)

作者简介: 饶云江(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者, 主要从事光纤传感和通信等方面研究。

如图1所示, 当金属细丝上的电流强度发生变化时, 由于电光效应, 传输光的相位会发生相应变化。利用上述环形谐振腔传输矩阵求解各端口的电场方程, 可以得出光通过整个环的输出光强和输入光强比值为<sup>[5-6,8]</sup>:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{|E_4|^2}{|E_1|^2} = (1 - \gamma_0) \frac{K + \tau^2 - 2\tau\sqrt{K} \sin(\varphi)}{1 + \tau^2 K - 2\tau\sqrt{K} \sin(\varphi)} \quad (1)$$

式中,  $\gamma_0$  为能量的耦合损耗系数;  $K$  为耦合系数;  $\varphi$  为光相位;  $\tau = (1 - \gamma_0)^{1/2} e^{(-\alpha_0 L_p / 2)}$  为光在整个环形谐振腔中传输一周的损失振幅;  $\alpha_0$  为光纤的传输损耗系数。随着电流强度增加, 根据电光效应可得:

$$\varphi = \beta L_p + \delta_{NL} + \varphi_e \quad (2)$$

$$\varphi_e = \frac{2\pi L_p}{\lambda} \Delta n \quad (3)$$

$$\varphi_e = \frac{\pi}{\lambda} L_p n^3 \gamma_e \bar{E} = \frac{\pi}{\lambda} L_p n^3 \gamma_e \frac{U_{AB}}{d} \quad (4)$$

式(2)中  $\beta L_p$  为光在环中传输一周的相位变化;  $\delta_{NL}$  为光纤中的非线性效应引起的光相位变化;  $\varphi_e$  为线性电光效应引起的相位变化。其中,  $\text{SiO}_2$  的电光系数  $\gamma_e = 0.44 \text{ pm/V}$ , 谐振腔的折射率  $n = 1.45$ , 导体棒的长度  $d = 0.1 \text{ m}$ , 环直径  $d = 500 \text{ }\mu\text{m}$ , 周长  $L_p$  约为  $1.57 \text{ mm}$ ;  $U_{AB}$  为电流通过金属细丝后, 细丝两端电压差。由于输入光强度为  $2.2 \text{ dB}$ , 光强度不足以引起光纤中的非线性Kerr效应, 从而非线性效应引起的相位变化可以忽略, 式(2)可以简化为  $\varphi = \beta L_p + \varphi_e$ 。

图2表明在不同电流强度调制下, 谐振峰将发生漂移。当施加的电流从  $9.8 \text{ mA}$  增加到  $117.5 \text{ mA}$  时, 波长调制了  $0.06 \text{ nm}$ 。如图3所示, 理论仿真表明波长对电流调制因子为  $510 \text{ pm/A}$ , 线性系数为  $0.997$ 。

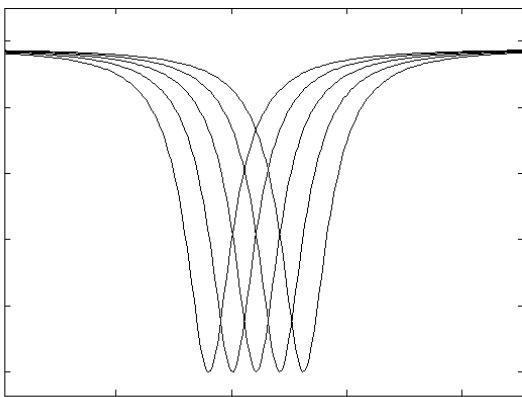


图2 电流变化引起的谐振峰漂移的仿真结果

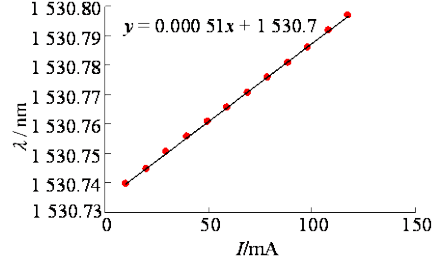


图3 电流强度变化与谐振腔光波长漂移关系

## 2 实验

### 2.1 电流调制

根据上述理论分析, 构建的电流调制微光纤环形谐振腔的实验系统如图4所示。实验中所研究的微光纤通过去除普通单模光纤的涂覆层后加热拉锥形成, 其直径约为  $2 \sim 3 \text{ }\mu\text{m}$ 。通过微动台对微光纤进行操作, 使微环直径约为  $518 \text{ }\mu\text{m}$ 。标准光纤传播的光通过锥形区耦合进入微光纤后, 以倏逝波的形式在微光纤之间传播<sup>[11]</sup>。将电流调制范围在  $9.79 \sim 117.51 \text{ mA}$  间, 扫描激光从光纤传感分析仪(Si720, Micron Optics, USA)出来后, 经过偏振控制器和微光纤谐振腔, 最后由分辨率为  $2.5 \text{ pm}$  的光纤传感分析仪测试波长  $1510 \sim 1590 \text{ nm}$  范围内的透射光谱。

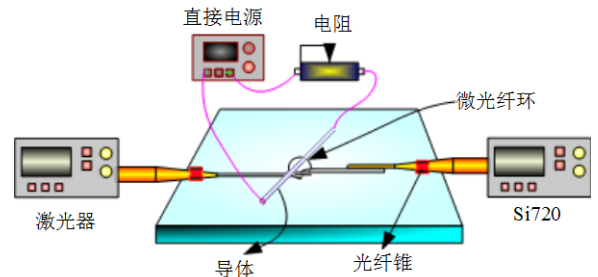


图4 微光纤环形谐振腔实验系统

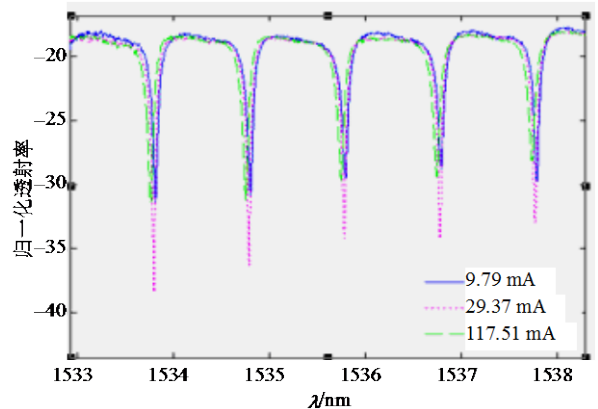


图5 电流变化引起谐振峰漂移的光谱图

在不同电流强度调制下, 谐振峰发生漂移时, 谐振腔输出端对应的光谱图, 如图5所示, 如图6所示为中心波长在  $1537.8 \text{ nm}$  附近的光谱图。当施加的

电流从9.79 mA增加到117.51 mA时, 波长调制了0.057 nm。实验结果如图7所示, 波长对电流的调制因子为500 pm/A, 拟合线性系数为0.998。

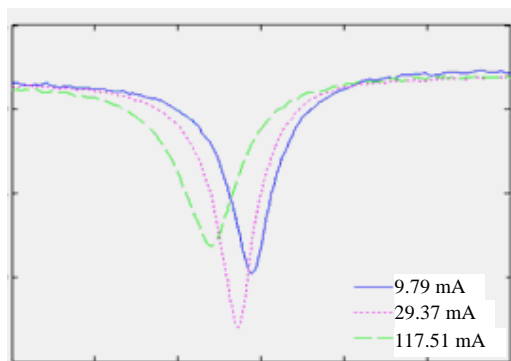


图6 在1 537.8 nm附近电流变化引起谐振峰漂移的光谱图

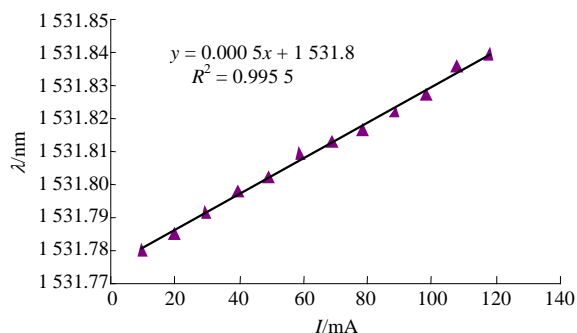


图7 电流强度变化与谐振腔光波长漂移关系

## 2.2 温度响应

随着调制电流强度的增加, 通有电流的金属细丝产生热效应, 细丝的温度上升, 从而引起谐振腔产生波长漂移。为了更精确地测量电流强度所引起的谐振光谱的变化, 本文分析了热效应对微光纤环形谐振腔输出光谱的影响。温度变化所带来的微光纤谐振波长的变化可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta\lambda/\lambda = (\Delta L/L + \Delta n/n)_{\text{Temp}} = (\alpha + \beta)\Delta T \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为微光纤热膨胀系数;  $\beta$  为微光纤热光系数。对二氧化硅微光纤,  $\alpha$  为  $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,  $\beta$  为  $0.05 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。测试表明, 在9.79~117.51 mA范围内, 金属丝对光纤环境温度的改变小于  $0.2^{\circ}\text{C}$ , 通过上述理论可以计算出金属细丝发热所引起的波长漂移约为2 pm, 即18 pm/A。因此, 热效应引起的谐振峰漂移量远远小于电流调制引起的谐振峰漂移量, 相对于电光效应对微光纤环形谐振腔输出光谱的影响可以忽略不计。为了验证热效应对微光纤环形谐振腔输出光谱的影响, 利用一只光纤布拉格光栅(FBG)对电流作用下的金属细丝产生的热效应进行研究。通过改变电流强度, 观察FBG中心波长的漂移情况, 如图8所示。实验结果表明温度引起的波长漂移为

20 pm/A, 与理论计算范围内漂移数值一致, 而波长对电流的调制因子为500 pm/A, 因此, 金属细丝发热所带来的温度效应可以忽略。

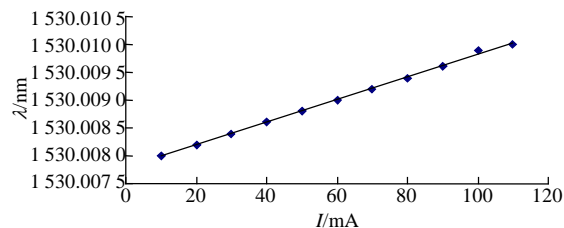


图8 引起热效应的电流变化与FBG波长漂移关系

## 3 结论

本文对微电流调制下二氧化硅微光纤环形谐振腔的电光效应进行研究, 通过理论分析和实验得到电流对微光纤环的谐振波长的调制因子约为500 pm/A。在该谐振腔中, 因电流通过金属细丝产生的温度变化所引起的谐振波长漂移远小于电流调制所引起的谐振波长漂移。本文利用微光纤构成具有高品质因素的环形谐振腔, 并研究了其在微小电流调制下的电光效应。该微光纤环形谐振腔结构由于体积小、精细度高, 有望应用于研制电光调制的光纤在线滤波器以及MEMS器件的微电流测量等领域。

## 参考文献

- [1] BEAUGEOIS M, PINCHEMEL B, BOUZAOUI M, et al. All-optical tunability of InGaAsP/InP microdisk resonator by infrared light irradiation[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(1): 35-37.
- [2] GROVER R, IBRAHIM T A, KANAKARAJU S, et al. A tunable GaInAsP-InP optical microring notch filter[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 2004, 16(2): 467-469.
- [3] SUMETSKY M, DULASHKO Y, FINI J M, et al. The microfiber loop resonator: theory, experiment, and application[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 242-250.
- [4] SUMETSKY M. Optical fiber microcoil resonator[J]. *Opt Express*, 2004, 12(10): 2303-2316.
- [5] VIENNE G, GRELU P, PAN Xin-yun, et al. Theoretical study of microfiber resonator devices exploiting a phaseshift[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2008, 10: 1-9.
- [6] STOKES L F, CHODOROW M, SHAW H J. All-single-mode fiber resonator[J]. *Opt Lett*, 1982, 7(6): 288-290.
- [7] TONG Li-min., GATTASS R R, ASHCOM J B, et al. Sub-wavelength diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426: 816-819.
- [8] DAI Dao-xin, HE Sai-ling. Highly sensitive sensor with large measurement range realized with two cascaded microring resonators[J]. *Opt Commun*, 2007, 279(1): 89-93.
- [9] WU Yu, RAO Yun-jiang, CHEN Yi-huai, et al. Miniature fiber-optic temperature sensors based on silica/polymer microfiber knot resonators[J]. *Opt Express*, 2009, 17(20): 18142-18147.

编辑 张俊