

保持法拉第效应的光纤环行腔结构*

钱景仁 张志淳 张 华

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系光纤实验室, 合肥 230027)

摘 要 对两种扭转光纤环行腔结构进行了理论分析, 表明这两种结构能有效地保持法拉第效应, 可用于电流传感和光纤陀螺。另外这两种结构对环境温度影响有较强的抑止作用, 有较大的实用价值。

关键词 法拉第效应, 扭转光纤, 环行腔, 本征偏振态。

1 引 言

在光纤环行腔中, 使环行腔能对法拉第效应沿光纤累积而呈现一定的灵敏度, 对电流传感有重大意义, 而且这一效应是非互易的, 因而可以用来模拟光纤环行腔中的刹格乃克 (Sagnac) 效应, 可在光纤陀螺中得到应用。但由于光纤中线双折射引起的偏振扰动严重影响光纤中偏振面的法拉第旋转, 使法拉第效应湮没在其中, 因此普通环行腔不能保持法拉第效应。低线性双折射光纤^[1]是解决办法之一, 但它需要特别小心地缠绕, 技术难度大, 对外部环境非常敏感; 具有螺旋芯的圆双折射光纤^[2], 外径较粗, 不便于缠绕, 它的激励和与普通光纤的联接也存在困难; 高线性双折射高扭转光纤^[3], 虽可保持法拉第效应, 但在市场上难以获得。环行腔中一般存在两正交本征模, 它们的谐振峰间距在环境温度的扰动下发生漂移, 容易靠近甚至重合, 会严重影响环行腔的工作。本文提出利用普通单模光纤进行扭转, 光纤在外力扭转作用下产生圆双折射, 当扭转率较高时, 圆双折射将大于光纤中固有的及弯曲引起的线双折射, 能有效克服偏振扰动和本征模间的耦合, 使法拉第效应得以保持。文中对所提出的两种由扭转光纤构成的环行腔和它们在电流传感等方面的应用进行理论推导, 并对这两种结构的温度特性给出了理论和实验结果。

2 扭转光纤的耦合波描述

光纤中的线双折射、扭转、法拉第效应已由 Ulrich^[4, 5]、Day^[6] 等人分析过。对于长度为 Z 的一段光纤, 当法拉第效应、线性双折射和扭转效应沿光纤保持为固定值时, 输入输出场的横向分量可用琼斯 (Jones) 矩阵表示为^[4, 7, 8]:

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996-12-26; 收到修改稿日期: 1997-05-21

$$\begin{pmatrix} E_x(Z) \\ E_y(Z) \end{pmatrix} = \exp(-j\beta z) \begin{pmatrix} \cos(KZ) + j\frac{\Delta\beta_b}{2K} \sin(KZ) & \frac{X}{K} \sin(KZ) \\ -\frac{X}{K} \sin(KZ) & \cos(KZ) - j\frac{\Delta\beta_b}{2K} \sin(KZ) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{pmatrix} \quad (1)$$

这里选择 X 为快轴。其中 $X = F + \Lambda$, $K = \sqrt{X^2 + (\Delta\beta_b/2)^2}$, $F = 2VH$, $\Lambda = (g/2)\tau$; τ 为扭转率, 按右手定则为正, g 为旋光系数; $\Delta\beta_b$ 为扭转光纤中的线双折射; H 为外加轴向磁场强度, V 为 Verdel 常数, 当 H 与光传输方向一致时, 使光沿传播方向左旋, F 取正, 反向时, 使光沿传播方向右旋, F 取负。

扭转光纤中的场可用耦合模方程来描述^[4]:

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{pmatrix} = -j \begin{pmatrix} \beta - \Delta\beta_b/2 & j(F + \Lambda) \\ -j(F + \Lambda) & \beta + \Delta\beta_b/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{pmatrix} \quad (2)$$

将(2)式变换, 令 $E = OW$ 得:

$$dW/dz = NW \quad (3a)$$

$$\text{其中 } N = \begin{pmatrix} -j(\beta + X) & \Delta\beta_b/2 \\ -\Delta\beta_b/2 & -j(\beta - X) \end{pmatrix}, \quad O = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} j & 1 \\ 1 & j \end{pmatrix} \quad (3b)$$

由(3b)式可见, W 表示两圆极化波的幅度。它们之间存在着耦合, 能量在两圆极化波间交换。根据耦合模理论, 若 X 并不比 $\Delta\beta_b$ 大, 波间的耦合就必须考虑, 这样在光纤中无论是圆极化波或线极化波都不能保持不变地传输, 因此严重时线双折射就把法拉第效应掩盖了。而当 $\Lambda \gg \Delta\beta_b$ 从而使 $X \gg \Delta\beta_b$ 时, 则可以忽略圆极化波间的耦合, 使法拉第效应不受线双折射的影响。

3 扭转光纤环形腔

利用上面的推导, 分析两种形式的扭转光纤环形腔, 如图 1 所示。一是单向扭转的环形腔, L_1 、 L_2 沿一个方向扭转; 二是双向扭转的环形腔, L_1 、 L_2 扭转方向相反, 长度差 $\Delta L = L_1 - L_2$ 。之所以提出这两种结构, 是为了能在光纤环形腔上加上沿光纤的磁场以产生法拉第效应。

3.1 单扭光纤环形腔

L_1 、 L_2 同为右旋扭转, 磁场方向如图 1 所示。环形腔的光以顺时针从 3 端沿环路一周回到 3 端的琼斯传输矩阵可写为:

$$T_{cw} = j \sqrt{1 - \gamma_0} \sqrt{K} \exp(-j\beta L_e - \alpha_0 L) \times \begin{pmatrix} \cos(KL) + j\frac{\Delta\beta_b}{2K} \sin(KL) & \frac{X}{K} \sin(KL) \\ -\frac{X}{K} \sin(KL) & \cos(KL) - j\frac{\Delta\beta_b}{2K} \sin(KL) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 $L = L_1 + L_2$, $j\sqrt{K}$ 为耦合系数, $\sqrt{1 - \gamma_0}$ 为耦合损耗, $\exp(-\alpha_0 L)$ 为光纤环路损耗。根据 Iwatsuki^[9]等人的分析, 传输矩阵的本征矢量本身代表了本征偏振态。本征偏振态沿环路

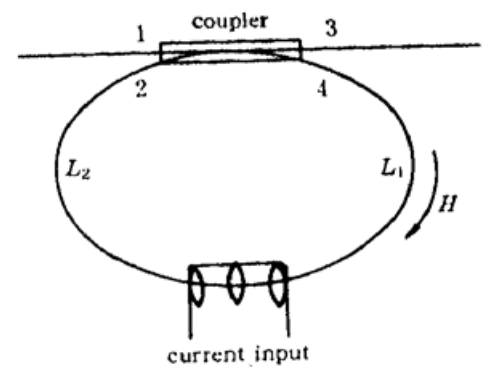


Fig. 1 Twisted fiber ring resonator

一周不改变其偏振状态, 而本征值的幅角则代表了本征偏振态的周传输相移。因而两本征模谐振峰的间距为本征值的幅角差。根据前面的分析可知腔中两正交本征模为两圆偏振态。由(4)式解得其本征值为:

$$\lambda_{1,2} = j \exp(-\alpha_0 L) \sqrt{K} \exp(j\beta L \pm jKL) \quad (5)$$

两本征偏振态谐振峰的间距

$$\Delta\phi = \arg \lambda_1 - \arg \lambda_2 = 2KL = 2[\sqrt{(\Delta\beta_b/2)^2 + \chi^2}]L \quad (6a)$$

当 $\chi \gg \Delta\beta_b$ 时

$$\Delta\phi \approx 2\chi L \quad (6b)$$

当光沿逆时针方向传播时, 传输矩阵如同(4)式, 只是其中 $\chi' = \Lambda - F$ 。同理求得环形腔的两本征偏振态谐振峰的间距, 当 $\chi' \gg \Delta\beta_0$ 时得:

$$\Delta\phi' \approx 2\chi'L \quad (7)$$

顺时针、逆时针谐振峰的间距差为:

$$\Delta\phi - \Delta\phi' = 2(K - K')L \approx 4FL \quad (8)$$

χ' 中 F 的负号是由于法拉第效应的非互易性造成的。通过检测顺时针或逆时针光两谐振峰 $2\chi L$ 的变化, 或顺时针光两谐振峰与逆时针光两谐振峰的间距差 $4FL$, 就可以得到 F , 求出所加电流的值, 因此单向扭转的光纤环形腔可以用于电流传感。另外由于法拉第效应的非互易性, 这种结构可用于光纤环行腔陀螺来模拟斜格乃克效应。

3.2 双向扭转光纤环形腔

L_1 右旋扭转、 L_2 左旋扭转, 磁场方向同上。其顺时针方向琼斯周传输矩阵为

$$\begin{aligned} T_{cw} &= j \sqrt{1 - \gamma_0} \sqrt{K} \exp(-j\beta L - \alpha_0 L) \begin{bmatrix} A_2 \exp(j\zeta) & B_2 \\ -B_2 & A_2 \exp(-j\zeta) \end{bmatrix} \times \\ &\quad \begin{bmatrix} A_1 \exp(j\zeta) & B_1 \\ -B_1 & A_1 \exp(-j\zeta) \end{bmatrix} \\ &= j \sqrt{1 - \gamma_0} \sqrt{K} \exp(j\beta L - \alpha_0 L) \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} t_{11} &= t_{22}^* = A_1 A_2 \exp[j(\zeta_1 + \zeta_2)] - B_1 B_2 \\ t_{12} &= -t_{21}^* = A_1 B_2 \exp(-j\zeta_1) + B_1 A_2 \exp(j\zeta_2) \\ A_i &= \sqrt{\cos^2(K_i L_i) + (\Delta\beta_b/2K_i)^2 \sin^2(K_i L_i)}, \\ B_i &= (\chi/K_i) \sin(K_i L_i), \quad \zeta_i = \text{tg}^{-1}[(\Delta\beta_b/2K_i) \text{tg}(K_i L_i)] \\ K_i &= \sqrt{\chi_i^2 + (\Delta\beta_b/2)^2}, \quad \chi_1 = F + \Lambda, \quad \chi_2 = F - \Lambda \end{aligned}$$

周传输矩阵 T_{cw} 的本征值为:

$$\lambda_1 = j\gamma \sqrt{K} \sqrt{|t_{11}|^2 + |t_{12}|^2} \exp[j(\zeta - \beta L)] = \gamma \sqrt{K} \exp[j(\zeta - \phi)] \sqrt{|t_{11}|^2 + |t_{12}|^2} \quad (10a)$$

$$\lambda_2 = \gamma \sqrt{K} \exp[-j(\zeta + \phi)] \sqrt{|t_{11}|^2 + |t_{12}|^2} \quad (10b)$$

则两本征模谐振峰之间的间隔为:

$$\Delta\phi = 2\zeta \quad (11)$$

其中

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{\sqrt{[\operatorname{Im}(t_{11})]^2 + |t_{12}|^2}}{\operatorname{Re}(t_{11})}$$

当 $\lambda \gg \Delta\beta_b$ 时, 可得两本征偏振态谐振峰之间的间隔为:

$$\Delta\phi \approx 2(K_1 L_1 + K_2 L_2) \approx 2FL + 2\Lambda\Delta L \quad (12)$$

同理对于逆时针光

$$\Delta\phi \approx 2(K'_1 L_1 + K'_2 L_2) \approx -2FL + 2\Lambda\Delta L \quad (13)$$

顺时针、逆时针谐振峰的间距差为:

$$\Delta\phi - \Delta\phi' = 4FL \quad (14)$$

如同单向扭转的光纤环形腔, 当加上法拉第效应后, 双向扭转的光纤环形腔的两谐振峰, 产生类似单向扭转的效果, 从而双向扭转的光纤环形腔也可以用于电流传感和光纤陀螺。

4 两种腔结构的温度特性

对于单向扭转光纤环形腔, 由于法拉第效应产生的圆双折射比扭转效应小得多, 温度效应时可忽略。考虑线双折射时, 两本征偏振态谐振峰的间距为:

$$\Delta\phi = 2KL = 2\sqrt{(\Delta\beta_b/2)^2 + (\alpha\tau)^2}L \quad (15)$$

由(15)式可见, 当 $\Delta\beta_b$ 一定时, 通过调节 $\alpha\tau$ 可以将两本征偏振模谐振峰的间隔控制在任一值上。通常为了防止由于温度漂移而导致两谐振峰发生相互重叠, 一般将两谐振峰的间隔控制在 π 的附近。当外界温度发生变化时, $\Delta\beta_b$ 、 α 以及 L 等都将随之变化, 从而两本征偏振态谐振峰的间距也将随温度变化, 即发生相对温度漂移。本征偏振态谐振峰的间距随温度变化的公式可表示为:

$$\frac{1}{L} \frac{d\Delta\phi}{dT} = \frac{1}{K} \left[\Delta\beta_b \frac{d\Delta\beta_b}{dT} + 2\alpha\tau \left(\tau \frac{d\alpha}{dT} + \alpha \frac{d\tau}{dT} \right) \right] + \frac{2K}{L} \frac{dL}{dT} \quad (16)$$

通常 $d\tau/dT = 0$, 由文献[5]可得:

$$d\Delta\beta_b/dT = (3\Delta\beta_b/n)(dn/dT)$$

根据文献[10, 11]有:

$$dL/LdT = 5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}, \quad d\alpha/dT = 1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}, \quad dn/dT = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$$

可见此结构有较好的温度特性。同样对于双向扭转光纤环形腔, 当线双折射很小时, 忽略法拉第效应, 两本征偏振态谐振峰之间的间隔可写为:

$$\Delta\phi = 2K\Delta L \quad (17)$$

本征偏振态谐振峰之间的间隔随温度变化的公式为:

$$\frac{1}{\Delta L} \frac{d\Delta\phi}{dT} = \frac{1}{K} \left[\Delta\beta_b \frac{d\Delta\beta_b}{dT} + 2\alpha\tau \left(\tau \frac{d\alpha}{dT} + \alpha \frac{d\tau}{dT} \right) \right] + \frac{2K}{\Delta L} \frac{d\Delta L}{dT} \quad (18)$$

比较(15)、(18)式可见, 由于有 $\Delta L < L$, 所以在外界温度变化幅度相同的情况下, 对于双向扭转的光纤环形腔, 其两个本征偏振态谐振峰之间的相对温度漂移将小于单向扭转的光纤环形腔。但是, ΔL 不能取为零(实际也不可能为零), 因为由(17)式可知, 当 $\Delta L = 0$ 时, 两本征偏振模谐振峰之间的间隔将变为零, 即两本征偏振模的谐振峰将重叠在一起。这不是所期望的。

由(17)可知, 为了使两本征偏振模谐振峰之间的间隔固定为 π 的奇数倍, ΔL 应该满足关系式 $\Delta L = (2m + 1)\pi/2K$, 其中 m 为任意整数。另外, 根据(18)式, 为了减小温漂, ΔL 应该

取得越小越好。综合这两方面的因素,可知 ΔL 应取为 $\Delta L = \pi/2K$, 但这个数值很小, 很难精确实现。

5 实验结果

分别制作了单向扭转和双向扭转的两种环形腔, 并对这两种环形腔的温度漂移特性进行了测试, 其结果如图 2 和图 3 所示。(a) 和 (b) 分别是未加温度扰动时和用电吹风对环形腔加热 1 分钟后(温度上升了约 20°C) 的结果。实验中, 扭转光纤的扭转率为 50 circle/m , 环形腔的腔长为 5 m , $\Delta L = L_1 - L_2 = 0.35 \text{ m}$, 所用的压电陶瓷的直径为 40 mm 。对于单向扭转的光纤环形腔, $\Delta\phi \approx 70.8\pi$, 即两本征模谐振峰的间隔近似为 0.8π 。当 $L = 5 \text{ m}$ 时, 有 $d\Delta\phi/dT = 0.031 \text{ rad}/^{\circ}\text{C}$ 。同样, 对于双向扭转的光纤环形腔, 可得 $\Delta\phi \approx 5\pi$, 即两本征模谐振峰的间隔近似为 π , 并且有 $d\Delta\phi/dT = 0.0022 \text{ rad}/^{\circ}\text{C}$ 。

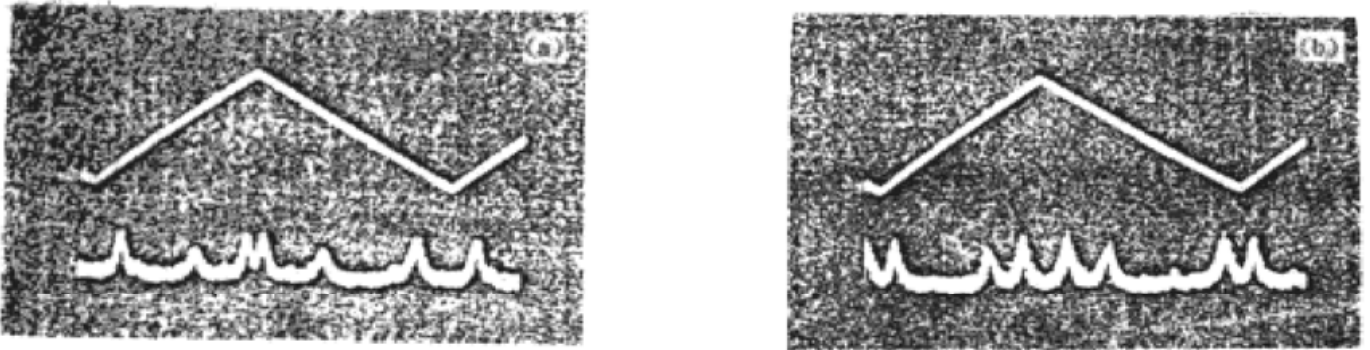


Fig. 2 The temperature characteristic of the one-way twisted optical fiber resonator. The above line is triangle voltage used on the PZT to modulate the resonator. (a) Normal condition, (b) Temperature is 20°C higher than normal condition



Fig. 3 The temperature characteristic of the two-way twisted optical fiber resonator. The above line is triangle voltage used on the PZT to modulate the resonator. (a) Normal condition, (b) Temperature is 20°C higher than normal condition

从上述计算结果可知, 无论是单向扭转的环形腔还是双向扭转的环形腔, 其温度漂移都是比较小的。而且, 由于 $\Delta L < L$, 一般双向扭转的环形腔要比单向扭转的环形腔的温度漂移小得多, 有较大的实用性。

由图 2 和图 3 可见, 即使当外界存在较大的温度扰动时, 由扭转光纤构成的环形腔的两本征模谐振峰的相对温度漂移也不会达到相互重叠的程度, 其实验结果与理论计算基本上是相吻合的。因此, 可以利用扭转光纤环形腔来构成电流传感器件。

小 结 扭转光纤构成的两种光纤环形腔可有效地保持法拉第效应, 因此这两种扭转光纤环形腔可在电流传感等方面得到应用。另外, 对这两种环形腔谐振峰的温度稳定性的研究, 表明这两种环形腔有较强的温度稳定性, 特别是双向扭转环形腔, 效果更好, 并用实验验证了这一点。

参 考 文 献

- [1] D. N. Payne, A. J. Barlow, J. J. Ramskov Hansen, Development of low and high birefringence optical fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(4) : 477~ 487
- [2] J. R. Qian, C. D. Hussey, Circular birefringence in helical-core fiber. *Electron. Lett.*, 1986, **22** : 515 ~ 517
- [3] 钱景仁, 李陆荣, 用于电流传感器的高线性双折射高扭转光纤. *中国科学(A)*, 1989, (6) : 637~ 643
- [4] R. Ulrich, A. Simon, Polarization optics of twisted single-mode fibers. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(13) : 2241~ 2251
- [5] R. Ulrich, S. C. Rashleigh, W. Eickhoff, Bending-induced birefringence in single-mode fibers. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(6) : 273~ 275
- [6] G. W. Day, D. N. Payne, A. J. Barlow *et al.*, Faraday rotation in coiled, monomode optical fibers: Isolators, filters, and magnetic sensors. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(5) : 238~ 240
- [7] A. M. Smith, Polarization and magneto optical properties of single-mode fiber. *Appl. Opt.*, 1978, **17** (1) : 52~ 56
- [8] W. J. Tabor, A. W. Anderson, L. G. Van Uitert, Visible and infrared Faraday rotation and birefringence of single-crystal rare-earth ortho ferrites. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(7) : 3018~ 3021
- [9] K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguki, Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(15) : 2606~ 2612
- [10] D. M. Shupe, Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5) : 654~ 655
- [11] P. A. Nicati, K. Toyama, S. Huang *et al.*, Temperature effects in a Brillouin fiber ring laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(24) : 2123~ 2125

Twisted Fiber Ring Resonator of Keeping Faraday Rotation

Qian Jingren Zhang Zhichun Zhang Hua

(Optical Fiber Lab., Department of Electronic Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(Received 26 December 1996; revised 27 May 1997)

Abstract We analysed two kinds of optical fiber ring resonator structure made of twisted fiber, and indicated that the two kinds of structure can keep Faraday rotation and can be used in current sensors and optic fiber gyros. The structures are also counteractive to temperature disturbance. Theoretical and experimental results are given.

Key words Faraday rotation, twisted fiber, optical fiber ring resonator, eigenstate of polarization.