

基于全光纤萨格纳克干涉仪的温度不敏感磁场测量*

文峰 武保剑[†] 李智 李述标

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2013年1月28日收到; 2013年3月11日收到修改稿)

研究了双折射磁光光纤萨格纳克 (Sagnac) 干涉仪透射谱的磁场和温度敏感性. 实验表明, 干涉仪透射谱会随着温度的增加向短波长移动 (温度系数为 $-0.435 \text{ nm}/^\circ\text{C}$), 其波长依赖性则随着磁场的增加而降低. 据此, 通过调节干涉仪内偏振控制器状态实现了温度不敏感的磁场测量, 磁场系数为 $189 \text{ mW}/\text{T}^2$, 实验结果与理论分析一致.

关键词: 磁场测量, 磁光效应, 双折射, 萨格纳克干涉仪

PACS: 07.55.Ge, 78.20.Ls, 42.81.Gs, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.130701

1 引言

磁场测量和传感技术广泛应用于数据存储、飞机制造、移动通信等现代工业各个领域^[1]. 实现磁场测量的主要效应有霍尔效应、法拉第 (Faraday) 效应、磁致伸缩效应等^[2,3], 其中霍尔传感器已广泛应用于商用仪器中. 近年来, 基于光纤或光纤光栅的磁场/电流无源传感技术得到越来越多的重视. 利用磁致伸缩材料、磁流体改变光栅或光子晶体光纤中导光特性可以实现磁场测量^[4,5], 也可以利用光纤环形结构或萨格纳克 (Sagnac) 结构, 测量光功率、偏振角度变化实现磁场测量^[6-8]. 在磁场测量过程中, 温度漂移引起的结果不准确是亟待解决的问题. 目前研究表明, 采用温度补偿电路对数据结果进行修正可以消除温漂对磁场测量的影响^[9], 也可以在测量结构中利用温度敏感器件反向补偿温度对测量结果的影响^[10], 或利用光子晶体光纤等特殊材料自身的温度不敏感性实现温度不敏感磁场测量^[5]. 本文通过分析全光纤 Sagnac 干涉仪透射光谱的磁场和温度依赖特性, 提出了一种利用光纤固有磁光效应实现的全光纤型磁场测量方案, 实验演示了该方案在近 25°C 的温度变化范围内可实现温度不敏感的磁场测量.

2 全光纤 Sagnac 干涉结构理论模型

所考虑的全光纤 Sagnac 干涉仪结构如图 1 所示, 一段置于螺绕环内的光纤作为磁场测量介质, 耦合器 1 和 2 端口分别作为输入和输出端口, 而 3 和 4 端口连接螺绕环内的光纤和偏振控制器. 本文直接利用光纤固有的磁光效应来实现磁场传感, 因此缠绕在螺绕环内的光纤也称为磁光光纤. 光纤固有的磁光效应和双折射效应, 以及偏振控制器引入的可调双折射将对 Sagnac 干涉仪传输特性产生影响.

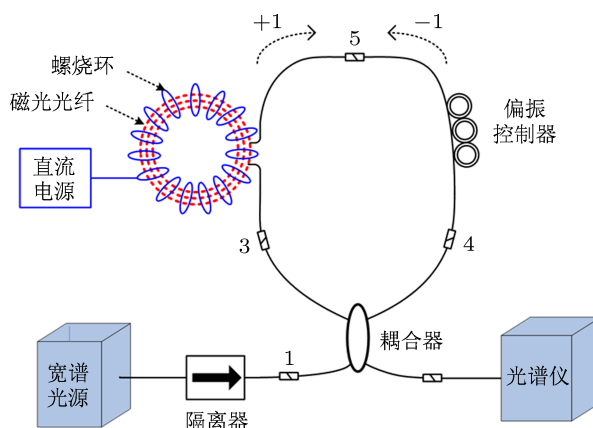


图 1 全光纤 Sagnac 干涉仪

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2011CB301703) 和国家自然科学基金 (批准号: 61271166) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

螺绕环提供沿光纤方向的直流磁场, 环内光纤固有 Faraday 效应用于本文的磁场测量, 而双折射

效应影响干涉仪的工作状态. 因此磁光光纤的传输矩阵表示为

$$T_{MO}^{\pm} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa z) \mp j \frac{\Delta\beta_F}{2\kappa} \sin(\kappa z) & \mp \frac{\kappa_m}{\kappa} \sin(\kappa z) \\ \pm \frac{\kappa_m}{\kappa} \sin(\kappa z) & \cos(\kappa z) \pm j \frac{\Delta\beta_F}{2\kappa} \sin(\kappa z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 + 和 - 分别对应于顺时针和逆时针传输; 磁光耦合系数 $\kappa_m = V_B \cdot B$, 对于顺磁性材料维尔德 (Verdet) 常数可以表示为 $V_B = \frac{K}{\lambda^2 - \lambda_t^2}$, λ_t 为跃迁波长, K 是与输入波长无关的常数, B 为加载在光纤上的磁通量 [11]; $\Delta\beta_F = \frac{2\pi \cdot \Delta n_F}{\lambda}$ 为磁光光纤双折射, Δn_F 为双折射系数; $\kappa = \sqrt{\frac{\Delta\beta_F^2}{4} + \kappa_m^2}$. 由于光纤型偏振控制器是通过挤压光纤来实现偏振态控制的, 因此将干涉仪内的偏振控制器等效为双折射 $\Delta\beta_{PC} = \frac{2\pi \cdot \Delta n_{PC}}{\lambda}$ 可调节的光纤, 其传输矩阵可以表示为

$$T_{PC}^{\pm} = (T_{PC}^{\mp})^* = \exp\left(-\frac{\alpha_{all}}{4}\right) \times \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{j\Delta\beta_{PC}z}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{j\Delta\beta_{PC}z}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 α_{all} 为整个干涉结构的损耗. 利用与文献 [12] 相似的推导方法获得全光纤 Sagnac 干涉仪的透射率

$$T = F_{\alpha} \left\{ 1 - \xi_R \left[\cos^2(\kappa L_F) \cos^2\left(\frac{\Delta\beta_{PC} L_{PC}}{2}\right) + \frac{\Delta\beta_F^2}{4\kappa^2} \sin^2(\kappa L_F) \sin^2\left(\frac{\Delta\beta_{PC} L_{PC}}{2}\right) \right] + (2 - \xi_R) \frac{\Delta\beta_F}{4\kappa} \sin(2\kappa L_F) \sin(\Delta\beta_{PC} L_{PC}) \right\}, \quad (3)$$

其中损耗系数 $F_{\alpha} = \exp\left(-\frac{\alpha_{all}}{2}\right)$, 耦合系数 $\xi_R = 4\rho(1 - \rho)$, ρ 为耦合器的耦合比, L_F 为螺绕环内磁光光纤长度, L_{PC} 为偏振控制器等效的光纤长度.

(3) 式中 Verdet 常数 V_B 和双折射均是波长的函数, 因此全光纤 Sagnac 干涉仪的透射谱表现出波长相关性. 需指出的是, 本文的理论模型在文献 [12] 的基础上, 独立考虑了偏振控制器引起的双折射变化, 因此该模型可以区分温度和磁场对 Sagnac 干涉仪透射光谱的不同影响.

3 磁场和温度对全光纤 Sagnac 干涉仪透射谱的影响

实验搭建了如图 1 所示的全光纤磁场测量系统, 其中缠绕在螺绕环内的磁光光纤长度 $L_F = 150$ m, 整个 Sagnac 结构的损耗系数 $F_{\alpha} = 0.11$, 耦合器的耦合比 $\rho = 0.492$. 实验中利用宽谱光源发出 C 波段宽谱光, 通过改变干涉仪内的偏振控制器调节环内总双折射, 并利用光谱仪 (Anritsu, MS9740A) 测量透射光谱特性. 磁场加载装置是内径为 92 mm 的螺绕环, 通过增加驱动电流可以获得沿光纤方向最大 180 Gs ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$) 的磁场强度.

图 2 给出了实验测量的磁场对全光纤 Sagnac 干涉仪透射光谱的影响. 由图 2(a) 可知, 磁场 $B = 0$ Gs 时, 对应于最低透射率的波长为 1532.347 nm. 在该波长处, Sagnac 透射率对磁场的依赖曲线如图 2(b) 所示, 增加和降低磁场获得的曲线完全重合, 这表明光纤没有磁滞效应. 图 2 中的实线是根据 (3) 式计算得到的理论结果, 它们与实验结果基本一致. 理论计算参数与上述实验条件相同, 其他参数取值为: 偏振控制器中的光纤长度 $L_{PC} = 0.773$ m, 双折射系数 $\Delta n_{PC} = 9.9 \times 10^{-6}$; 螺绕环内磁光光纤的双折射系数 $\Delta n_F = 1 \times 10^{-10}$; 跃迁波长 $\lambda_t = 9 \times 10^{-7}$ m, 常数 $K = 3.1 \times 10^{-13}$ (rad·m)/T, 即 1550 nm 处的 Verdet 常数约 0.195 rad/(T·m). 由图 2 可以看出, 磁场主要引起全光纤 Sagnac 干涉仪透射率逐渐增加, 当磁场从 0 Gs 增加到 180 Gs 时透射率最大可改变 22 dB; 同时透射谱线逐渐平坦, 即磁场降低了干涉仪透射率的波长依赖性.

通过增加螺绕环内的温度, 考察全光纤 Sagnac 干涉仪透射谱的温度依赖特性, 实验结果如图 3 所示. 由图 3(a) 可知, 随着温度的增加, 干涉仪的透射谱向短波长方向移动, 即最小透射率对应的波长发生变化, 结果如图 3(b) 所示. 这与文献 [13] 的规律基本一致, 其温度系数为 $-0.435 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. 由于温度引起螺绕环内磁光光纤双折射发生变化, 因此通过

改变光纤双折射系数获得相应的理论结果, 实验和理论预期相同.

4 温度不敏感的磁场测量方案

由温度对干涉仪透射特性的影响可知, 全光纤 Sagnac 干涉仪透射曲线会随螺绕环内温度的增加向短波长方向平移. 据此, 我们提出一种温度不敏感的磁场测量方案: 首先调节干涉仪内的偏振控制器获得平坦的初始透射光谱, 再利用分布反馈

(DFB) 激光器发出的单波长探测光, 通过测量干涉仪透射端的光功率变化来实现磁场测量. 由于全光纤 Sagnac 干涉仪透射谱平坦, 即透射率没有波长依赖性, 温度引起的透射谱平移现象不会影响到磁场引起的光功率变化; 同时, 由于透射率的波长依赖性降低, 无需使用宽谱光源和光谱仪进行磁场的探测和解调. 因此, 本文采用单波长激光器和光功率计完成温度不敏感的磁场测量, 极大地降低了探测和解调成本.

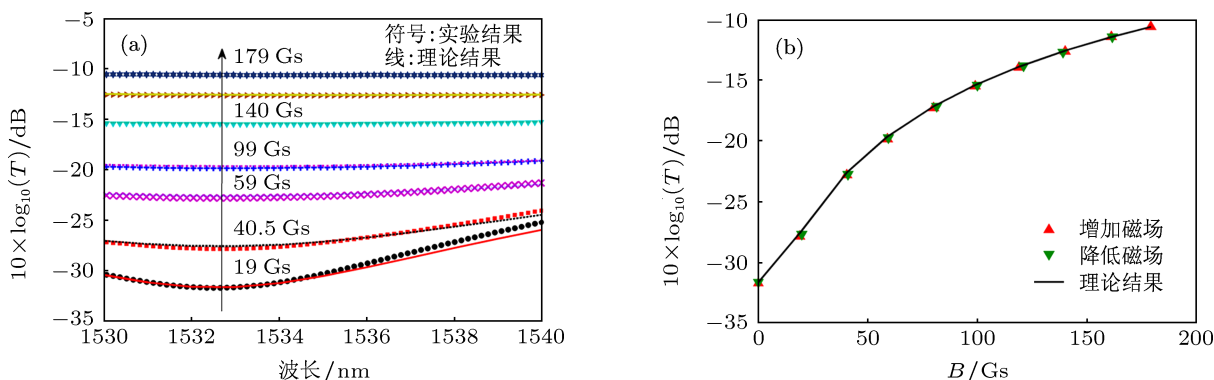


图2 磁场对全光纤 Sagnac 干涉仪的影响 (a) 透射光谱的磁场依赖特性; (b) 磁场引起 1532.347 nm 波长处透射率的变化

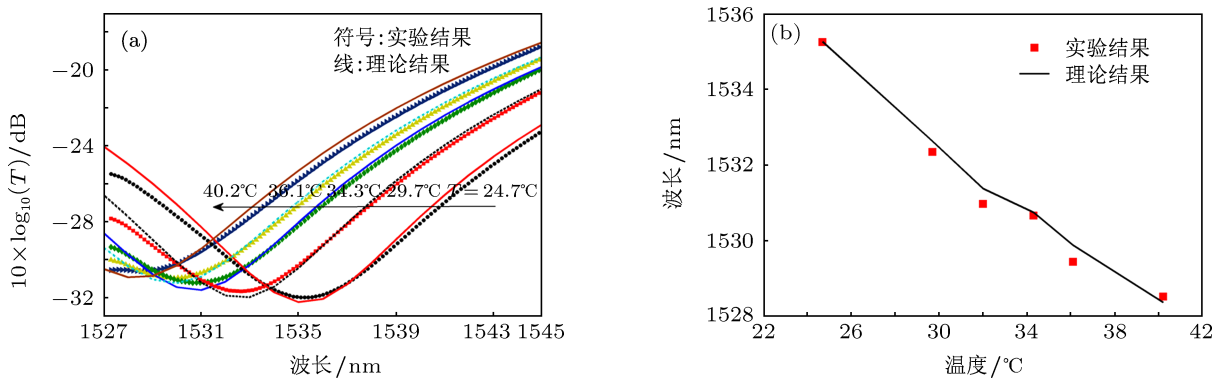


图3 温度对全光纤 Sagnac 干涉仪的影响 (a) 透射光谱的温度依赖特性; (b) 最小透射率对应的波长随温度的变化关系

上述实验结果显示, 螺绕环内光纤双折射远低于偏振控制器的等效双折射, 因此可以对 (3) 式进行简化, 获得磁场参数和透射率的线性关系以及磁场系数 C_B :

$$T \approx \xi_R F_\alpha L_F^2 \cos^2 \left(\frac{\Delta\beta_{PC} L_{PC}}{2} \right) V_B^2 B^2 + F_\alpha \left[1 - \xi_R \cos^2 \left(\frac{\Delta\beta_{PC} L_{PC}}{2} \right) \right], \quad (4)$$

$$C_B = \frac{dT}{dB \cdot B} = 2\xi_R F_\alpha L_F^2 \cos^2 \left(\frac{\Delta\beta_{PC} L_{PC}}{2} \right) V_B^2. \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 通过使用耦合比 $\rho = 0.5$ 的耦合器、

降低干涉仪损耗、增加螺绕环内光纤长度、降低双折射或采用磁光系数更高的光纤可以增加磁场测量的灵敏度. 图 4 给出了全光纤 Sagnac 干涉仪透射光谱的实验和理论曲线, DFB 激光器输出波长为 1549.82 nm, 输出功率约为 12.6 dBm. 不同温度下全光纤 Sagnac 干涉仪透射光功率随磁场的变化关系如图 5 所示. 与不加磁场的情形相比, 180 Gs 的直流磁场可引起约 0.52 mW 的光功率变化, 即透射率改变 22 dB, 其磁场系数达到 189 mW/T². 实验同时测量了在室温情况下增加螺绕环内温度到

50.2 °C 过程中, 透射光功率的磁场依赖曲线基本相同, 验证了本文提出的磁场测量方案具有温度不敏感性特性.

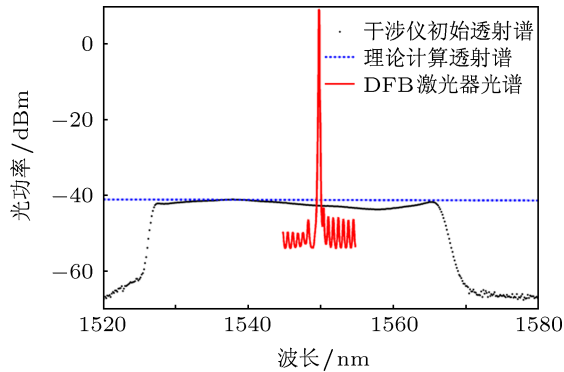


图4 全光纤 Sagnac 干涉仪透射谱以及 DFB 激光器输出光谱

5 结论

根据全光纤 Sagnac 干涉仪透射谱对温度和磁场的不同响应, 提出了温度不敏感磁场测量方案. 通过调节干涉仪内偏振控制器状态降低透射光谱

的波长依赖特性, 使用单波长探测光测量磁场引起的透射光功率变化. 实验结果表明, 180 Gs 的直流磁场引起 22 dB 的透射率改变, 其磁场系数达到 189 mW/T². 同时, 在 27.1—50.2 °C 的温度变化过程中, 透射光功率的磁场依赖特性基本没有变化, 这表明本文提出的磁场测量方案具有温度不敏感特性.

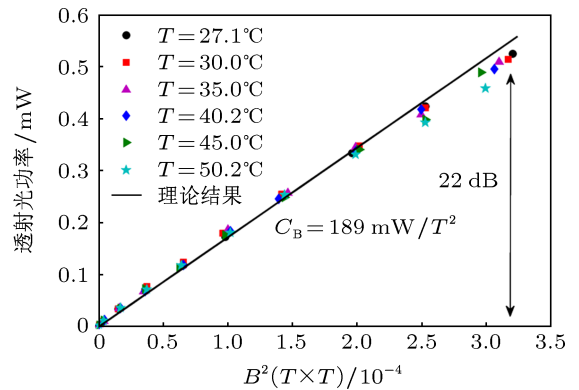


图5 温度不敏感的磁场测量结果

- [1] Lenz J, Edelstein A S 2006 *IEEE Sens. J.* **6** 631
- [2] Bian L X, Wen Y M, Li P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 883 (in Chinese) [卜雷祥, 文玉梅, 李平 2010 物理学报 **59** 883]
- [3] Su Y, Peng H, Feng K, Xu J H, Li Y Q 2009 *Chinese J. Lasers* **36** 219 (in Chinese) [苏洋, 彭晖, 冯奎, 徐俊华, 李玉权 2009 中国激光 **36** 219]
- [4] Reilly D, Willshire A J, Fusiek G, Niewczas P, McDonald J R 2006 *IEEE Sens. J.* **6** 1539
- [5] Zu P, Chan C C, Lew W S, Hu L, Jin Y, Liew H F, Chen L H, Wong W C, Dong X 2012 *IEEE Photonics J.* **4** 491
- [6] Zhang H, Qiu Y, Li H, Huang A, Chen H, Li G 2012 *Opt. Express* **20** 18591
- [7] Kemmet S, Mina M, Weber R J 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 07E702
- [8] Zu P, Chan C C, Lew W S, Jin Y, Zhang Y, Liew H F, Chen L H, Wong W C, Dong X 2012 *Opt. Lett.* **37** 398
- [9] Pereira J M D, Postolache O, Girao P M B S 1998 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **47** 494
- [10] Bohnert K, Brändle H, Brunzel M G, Gabus P, Guggenbach P 2007 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **43** 180
- [11] Berger S B, Rubinstein C B, Kurkjian C R, Treptow A W 1964 *Phys. Rev.* **133** A723
- [12] Wen F, Wu B J, Luo T 2011 *Appl. Opt.* **50** 3123
- [13] Kim D H, Kang J U 2004 *Opt. Express* **12** 4490

Temperature-insensitive magnetic-field measurement using all-fiber Sagnac interferometers*

Wen Feng Wu Bao-Jian[†] Li Zhi Li Shu-Biao

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications of the Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(Received 28 January 2013; revised manuscript received 11 March 2013)

Abstract

Magnetic field and temperature dependence of Sagnac interferometers consisting of birefringent magneto-optic fibers is investigated. Experimental results show that the transmission spectrum of the all-fiber Sagnac interferometer moves towards the shorter wavelength side with the increase in temperature (temperature coefficient $-0.435 \text{ nm}/^\circ\text{C}$), and the transmissivity becomes wavelength-insensitive for a larger magnetic induction. And then, the temperature-insensitive magnetic field measurement is achieved by adjusting the polarization controller within the interferometer, and the magnetic field coefficient is $189 \text{ mW}/\text{T}^2$ in the experiment, which is in agreement with the theoretical results.

Keywords: magnetic field measurement, magneto-optic effect, birefringence, Sagnac interferometer

PACS: 07.55.Ge, 78.20.Ls, 42.81.Gs, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.130701

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB301703), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61271166).

[†] Corresponding author. E-mail: bjwu@uestc.edu.cn