

# 光纤激光磁场传感器灵敏度与拍频频率的关系

胡能鹏 程凌浩 余力 梁贻智 梁浩 关柏鸥

暨南大学光子技术研究所, 广东 广州 510632

**摘要** 基于法拉第效应,正交双频光纤激光器已经被证明可用于实现磁场传感。但这种传感器对磁场的灵敏度与激光器初始的拍频频率相关。因此对这种传感器的磁场灵敏度与拍频频率的关系进行了研究。理论和实验结果表明,传感器对磁场的灵敏度与拍频频率间呈非线性关系,并且灵敏度随着拍频频率的减小而增大。该灵敏度存在一个由费尔德常数决定的上限值。对于实验中基于掺铒光纤制备的短腔光纤激光器,通过将初始拍频频率降至2 MHz,获得了激光器对磁场响应的最大灵敏度43 Hz/ $\mu$ T。此外,激光器初始拍频频率与抽运激光的偏振态也有关系。实验表明,通过调谐抽运激光的偏振态,可以动态地调谐传感器对磁场的灵敏度。

**关键词** 光学器件; 光纤传感器; 光纤光栅激光器; 法拉第效应; 磁场传感器

中图分类号 TP212.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0605005

## Relationship Between Beat Frequency and Sensitivity of Fiber Laser Magnetic Field Sensor

Hu Nengpeng Cheng Linghao Yu Li Liang Yizhi Liang Hao Guan Bai'ou

(Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

**Abstract** Through Faraday-effect, dual-polarization fiber grating laser based on magnetic field sensor is demonstrated. However, the sensitivity to magnetic field of such sensor is dependent on the initial beat frequency of the laser. Therefore, the relationship between the beat frequency and the sensitivity of such sensor is studied. Theoretical and experimental results show that the dependence of the sensitivity on the beat frequency is nonlinear. Moreover, the sensitivity increases with the decrease of beat frequency. However, there is an upper limit of this sensitivity which is determined by Verdet constant. By lowering the beat frequency to 2 MHz, the maximum sensitivity about 43 Hz/ $\mu$ T to magnetic field is achieved for a dual-polarization fiber grating laser inscribed on an erbium doped fiber. It also shows that the beat frequency is dependent on the polarization of the 980 nm pump. Therefore, dynamical tuning of the sensitivity optically can be demonstrated by tuning the polarization of the 980 nm pump.

**Key words** optical devices; fiber-optical sensors; fiber grating lasers; Faraday effect; magnetic field sensors

**OCIS codes** 060.2370; 230.3810; 280.3420

## 1 引言

磁场的测量在各个领域如导航、电流检测、空间和地球物理研究等都有广泛的应用。全光纤磁场传感器因其具有抗电磁干扰、重量轻、体积小和带宽大等优势而备受瞩目<sup>[1-2]</sup>。实现全光纤磁场传感器的原理有多种,如法拉第效应、磁致伸缩效应<sup>[3]</sup>、磁力、洛伦兹力和磁流体材料<sup>[4]</sup>等,其中法拉第效应由于可以实现对磁

收稿日期: 2015-01-03; 收到修改稿日期: 2015-02-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235005)、国家自然科学基金面上项目(11474133)、广州市珠江科技新型项目(2012J2200043)

作者简介: 胡能鹏(1990—),男,硕士研究生,主要从事光电信息获取与处理、光纤通信和光纤传感等方面的研究。

E-mail: nengpenghu@163.com

导师简介: 程凌浩(1977—),男,博士,研究员,主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: chenglh@ieee.org(通信联系人)

场的直接测量而广受欢迎<sup>[5]</sup>。伴随着光纤通信技术及激光器生产工艺的成熟,全光纤激光器成为迅速发展的新型器件<sup>[6]</sup>。基于双偏振光纤激光器和法拉第效应,实现了一种灵活小巧的全光纤磁场传感器<sup>[7]</sup>。由于使用了短腔的光纤激光器,这种磁场传感器的尺寸只有两厘米左右,当纵模间隔大于光纤光栅带宽时,只有单个纵模的光允许在谐振腔内振荡,激光器从而获得稳定的单纵模输出<sup>[8]</sup>。同时,利用光纤激光器输出的两个偏振模式之间外差干涉所产生的拍频,传感器的解调可以方便地采用电子学的技术手段来进行处理<sup>[9-11]</sup>。此外,研究表明,其对磁场的探测灵敏度还可以通过降低光纤激光器腔内的线性双折射而大大增强<sup>[12]</sup>。但是,目前的研究还局限于光纤激光器腔内线性双折射远大于磁场引起的圆双折射的情况,在这种情况下,此类光纤激光磁场传感器对磁场的灵敏度与激光器输出拍频频率成反比<sup>[13]</sup>。因此,通过降低光纤激光器腔内的线性双折射,从而降低光纤激光器的输出拍频频率,传感器对磁场的灵敏度可以得到提高。但是,倘若将光纤激光器输出拍频频率降低到趋近于0时,传感器的灵敏度在实际上是不可能趋于无穷大的。因此,通过降低光纤激光器输出拍频频率的方法不可能无限制地提高对磁场的灵敏度,传感器对磁场的灵敏度必然会存在一个上限。

本文对这类基于法拉第效应的外差光纤激光磁场传感器灵敏度与拍频频率之间的关系进行了深入研究。理论分析和实验研究表明,外差光纤激光磁场传感器对磁场的灵敏度与拍频频率间呈非线性关系,并且灵敏度随着拍频频率的减小而增大。该灵敏度存在一个由费尔德常数决定的上限值。对于实验中基于掺铒光纤制备的短腔光纤激光器,通过将初始拍频频率降至2 MHz,获得了激光器对磁场响应的最大灵敏度43 Hz/ $\mu$ T。此外,激光器初始拍频频率与抽运激光的偏振态也有关系。实验表明,通过调谐抽运激光的偏振态,可以动态地调谐传感器对磁场的灵敏度。

## 2 理论分析

本文所用的光纤磁场传感器是由一个正交双偏振光纤激光器(DBR)构成<sup>[14-15]</sup>。由于光纤内部存在一定的双折射,因此激光器的输出具有两个偏振态正交的模式,并且这两个正交偏振的模式间存在一定的频率差。该频率差正比于激光器腔内的双折射<sup>[16]</sup>:

$$\nu = \frac{c}{n_0 \lambda_0} B, \quad (1)$$

式中 $\nu$ 是激光器两个正交偏振模式之间的频率差, $c$ 是真空中光速, $\lambda_0$ 是激光波长, $n_0$ 和 $B$ 分别表示光纤中的平均折射率及双折射。两个正交偏振模式经光电探测器检测后会产生拍频信号,其拍频频率等于正交偏振模式间的频率差 $\nu$ 。因此,通过辨别拍频的频移,使双折射变化的任何扰动都可以被检测到。通常,光纤激光腔里存在一个本征线性双折射 $\beta$ ,由它导致的本征偏振模式是两个线偏振模式。当光纤激光腔被放置于一个平行于光纤轴向的磁场时,磁场导致的法拉第旋转效应使得腔里产生圆双折射。因此,当有平行磁场施加在光纤激光腔时,激光腔内的本征线性双折射和因平行磁场引起的圆双折射叠加起来形成椭圆双折射,其大小为<sup>[17]</sup>

$$\Omega = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (2)$$

式中 $\Omega$ 为椭圆双折射, $\alpha$ 为圆双折射, $\beta$ 为线性双折射,单位均为rad/m。

在非铁磁材料中,磁场的法拉第效应产生的圆双折射引起一个沿磁场方向传输的线偏振光的偏振面发生旋转,此法拉第旋转角与所施加的磁场强度 $H$ 成正比,由磁场引起的圆双折射可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\alpha = 2VH, \quad (3)$$

式中 $V$ 表示费尔德(Verdet)常数, $H$ 表示磁场。在无磁场的自由状态下,激光器的初始拍频只决定于本征线性双折射。因此,由(1)式可知,自由状态下激光器的初始拍频可表示为

$$\nu_0 = \frac{c}{n_0 \lambda_0} B = \frac{1}{2\pi} \frac{c}{n_0} \beta, \quad (4)$$

式中 $\nu_0$ 是无磁场作用时激光器输出的初始拍频频率。因此,激光腔内本征线双折射可由激光器在无磁场时的初始拍频频率得到,即

$$\beta = 2\pi \frac{n_0}{c} \nu_0. \quad (5)$$

由(2)~(5)式可得,在有磁场作用时,激光器拍频频率与磁场强度的关系式为

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{c}{n_0} \sqrt{4V^2 H^2 + 4\pi^2 \frac{n_0^2}{c^2} \nu_0^2} \quad (6)$$

由以上分析可知,通过测量激光器在磁场作用下的拍频频率变化,可进而推算出激光器周围的磁场强度大小,实现对磁场的光纤光学测量。

### 3 实验结果与分析

实验中所用的正交偏振双频光纤激光器是由 193 nm 准分子激光器在掺铒光纤(FibercoreM-12)上刻写分布式布拉格反射(DFB)光纤光栅激光器<sup>[19-20]</sup>,高反端与低反端光栅长度分别为 7 mm 和 6 mm,两个光栅的间距为 6 mm,掺铒光纤在 979 nm 波长处的吸收系数为 11.3 dB/m。当使用 974 nm 的抽运源时,所制备的光纤激光器会发射出波长为 1536.5 nm 的激光。将激光器放入温度为 230 °C 的温控炉进行退火处理 2 h,激光器峰值频率的稳定性及拍频信号的强度得到较大改善。在自由状态(即没有外加磁场或是其他物理量作用于光纤激光腔)下,该激光器在光电探测器上拍频输出 334.4 MHz 的初始拍频信号。

实验装置如图 1 所示,其示意图如图 2 所示,图中 ISO 表示光隔离器,WDM 表示波分复用器,PC 表示偏振控制器,PD 表示光电探测器。实验采用了东方晨景定制的 EM3 型电磁铁,两个由铜线绕制在磁柱上的电磁铁产生一个平行于正交双偏振光纤激光器的磁场,在磁柱轴心位置处定制有一个直径为 5 mm 的贯穿圆形通孔以便于光纤器件穿过。由于铒离子的双光子吸收过程,在光纤激光器工作时会同辐射出 520 nm 波段处的绿色荧光。将绿色荧光的发光位置置于两个磁极之间的空隙处。在磁柱所处的区域,由于磁柱的磁导率远大于空气,绝大部分磁场处于磁柱中,因此位于磁柱中心贯穿通孔中的光纤没有受到磁场作用。而在两个磁柱磁极间的空隙处,磁场从磁极面泄露出来并扩散至贯穿通孔的位置,形成一段均匀磁场作用于光纤激光器。采用高斯计来测量磁场强度,当施加磁场时,拍频频率转移至更高的频率。通过通用接口总线(GPIB)接口,利用 LABVIEW 控制频谱仪(RF spectrum analyzer)连续采集拍频频率数据来监测激光器的拍频频率,便可测量出由磁场引起的拍频频移。对所制备的光纤光栅激光器在一段时间后施加一个 0.64 T 的磁场,持续一段时间之后,撤去磁场,光纤光栅激光器恢复到原来的自由状态,引起拍频频率的急剧转变,所记录的拍频频率曲线如图 3 所示。通过计算光纤光栅激光器在自由状态和施加磁场时的频率差,可得

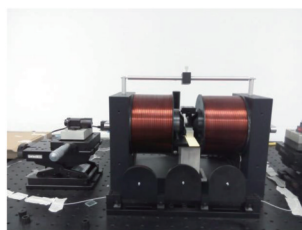


图 1 实验测量装置

Fig.1 Actual measuremental setup

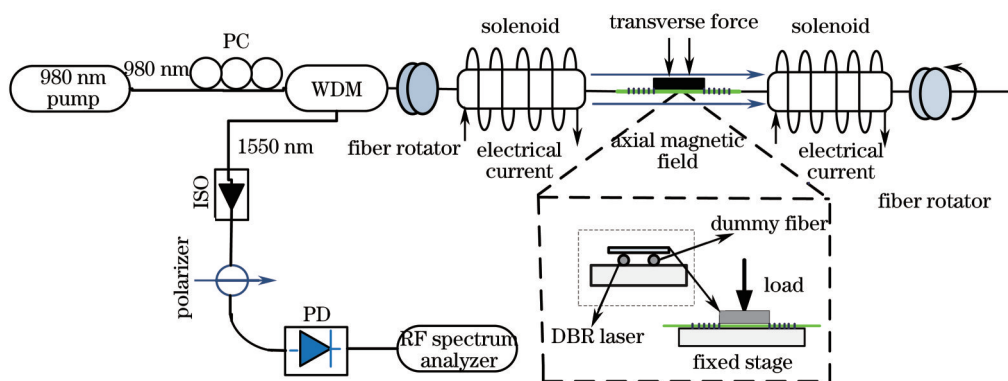


图 2 基于法拉第效应的外差光纤激光磁场传感器灵敏度测量装置示意图

Fig.2 Schematic of the setup for the measurement of the sensitivity for Faraday-effect based heterodyning fiber laser magnetic field sensor

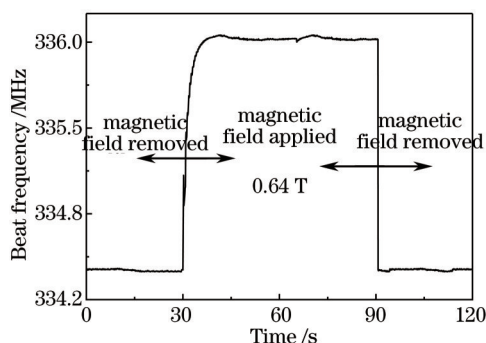


图3 在0.64 T磁场中测量得到的拍频频率变化曲线

Fig.3 Measured beat frequency shifts in a 0.64 T magnetic field

0.64 T 的磁场引起该激光器约 1.6 MHz 的拍频频移。

由理论分析可知,光纤光栅激光器对磁场的灵敏度与激光器的初始拍频频率有关。对于正交偏振双频光纤激光器,沿着激光器的快轴或者慢轴施加侧向压力可实现对拍频频率的调谐。压力施加装置如图2中的插图所示。光纤光栅激光器与一根空闲光纤平行放置在固定台台上并共同支撑重物,以保证重物所施加的压力是垂直于激光器。利用光纤旋转夹具旋转光纤,确定在同样压力下引起最大的拍频频率变化量的夹具旋转角度,从而确定光纤激光器的快轴和慢轴。随后沿着光纤激光器的快轴或者慢轴施加压力来调谐拍频频率。实验获得了初始拍频频率最低为 2 MHz 的激光器,并分别对未加磁场时初始拍频频率为 34.5, 17, 7, 2 MHz 时的激光器进行了测量实验。实验中,将磁场强度以 0.08 T 的间隔从 0 T 增大至 0.64 T,对上述四个拍频在磁场中的频率变化进行了测量,实验结果如图4所示。由(6)式可知,磁场导致的拍频频率变化与磁场和初始拍频的关系可表示为

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{c}{n_0} \sqrt{4V^2 H^2 + 4\pi^2 \frac{n_0^2}{c^2} \nu_0^2} - \nu_0, \quad (7)$$

当磁场的作用引起的圆双折射相比于光纤激光器腔内的线双折射很小时,也即  $VH \ll \pi n_0 \nu_0 / c$  时,(7)式可近似为

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \frac{1}{\nu_0} \frac{c^2}{2\pi^2 n_0^2} (VH)^2, \quad (8)$$

(8)式显示激光器的拍频频率越小,磁场引起的拍频频率变化越大,灵敏度越高。因此可以通过减小激光器的拍频频率来提高灵敏度。但是,当拍频频率趋向于 0 时,(8)式显示磁场引起的频率改变将趋向于无穷大,这在实际上是不可能的。这是因为(8)式所采用的近似在这种情况下不再有效。当磁场的作用引起的圆双折射相比于光纤激光器腔内的线双折射很大时,也即  $VH \gg \pi n_0 \nu_0 / c$  时,(7)式可近似为

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \frac{c}{\pi n_0} VH - \nu_0. \quad (9)$$

在这种情况下,(9)式显示磁场引起的拍频频率变化与磁场强度呈线性关系。

当因磁场的诱导产生的圆双折射远小于本征线性双折射时,由(8)式可求得费尔德常数。

$$V = \frac{\pi n_0}{cH} \sqrt{2\nu_0 \Delta\nu}. \quad (10)$$

由于在磁场为 0.08 T 时拍频频率变化较小,取不同起始拍频在 0.08 T 时的频率漂移数据,依据(10)式计算出费尔德常数,对计算结果求平均,得费尔德常数为 0.65 rad/(T·m)。图4中的实线显示了由(7)式计算得到的激光器初始拍频分别为 2, 7, 17, 34.5 MHz 时磁场强度与激光器拍频变化的理论曲线。由图可知,理论结果与实验测得的数据匹配得非常好,证实了之前的理论分析。由(8)式和(9)式以及图4可知,在激光器初始拍频频率较大时,磁场导致的频率变化与磁场强度可由一个二次曲线来近似<sup>[7]</sup>。但当激光器初始拍频频率较小时,磁场导致的频率变化与磁场强度呈线性关系。因此,磁场导致的频率变化与初始拍频频率有关,激光器对磁场的灵敏度也依赖于初始拍频频率。

光纤激光器对磁场的灵敏度可表示为磁场引起的拍频频率变化对磁场强度的求导,即

$$\frac{d(\Delta\nu)}{dH} = \frac{1}{2\pi} \frac{c}{n_0} \frac{4V^2 H}{\sqrt{4V^2 H^2 + 4\pi^2 \frac{n_0^2}{c^2} \nu_0^2}} \quad (11)$$

图5展示了根据(11)式计算得到的初始拍频为34.5, 17, 7, 2 MHz时的光纤激光器灵敏度理论曲线, 图中的灵敏度测量数值是根据图4中的相邻测量数据的差分值所计算的近似值, 因此与理论曲线存在一定误差, 但依然有着较好的吻合度和一致的趋势。由图可知, 随着初始拍频的减小, 激光器对磁场越灵敏, 并且激光器灵敏度随着磁场强度的增加而快速增强, 然后趋于平缓, 直到为一个定值, 此时灵敏度得到饱和。这在初始拍频为10 MHz以下时, 现象尤为明显。当初始拍频为2 MHz时, 激光器对磁场的最大灵敏度约为43 Hz/ $\mu$ T。

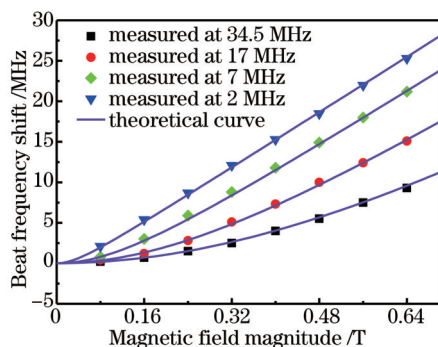


图4 对不同磁场强度和不同拍频频率测得的拍频频率变化  
Fig.4 Measured beat frequency shifts for various magnetic field magnitudes and different beat frequencies

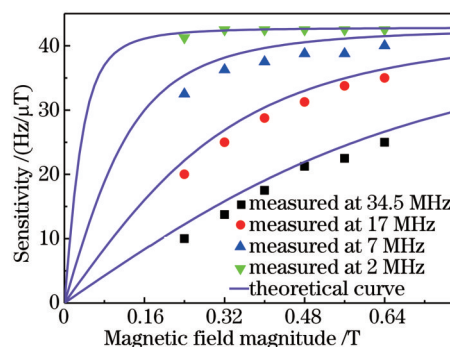


图5 不同初始拍频时传感器对磁场的灵敏度理论计算曲线  
Fig.5 Calculated results for the sensitivity to magnetic field for various beat frequencies

由于抽运激光的偏振态也可以影响光纤激光器腔内双折射, 进而影响激光器的拍频频率。因此, 通过调谐抽运激光的偏振态, 可实现对激光器的磁场灵敏度的全光调谐。实验中, 通过调节抽运激光输出所经过的偏振控制器, 对于未加磁场时激光器初始拍频频率为2 MHz和7 MHz时进行了抽运激光偏振态调谐。图6为测量数据。对于两个初始拍频, 通过抽运激光的偏振态调谐, 拍频频率的调谐范围均达到了3 MHz左右。对不同的拍频频率, 分别测量其在0.64 T与0.56 T磁场作用下导致的拍频变化, 测量结果与根据(7)式计算得到的理论曲线很好地吻合。实验结果表明, 抽运激光偏振态的变化主要引起激光器腔内线双折射的变化, 其对激光器的磁场灵敏度的调谐与通过压力等方式调谐激光腔内线双折射的效果一样。因此, 通过调谐抽运激光的偏振态, 可实现对激光器的磁场灵敏度的全光调谐。

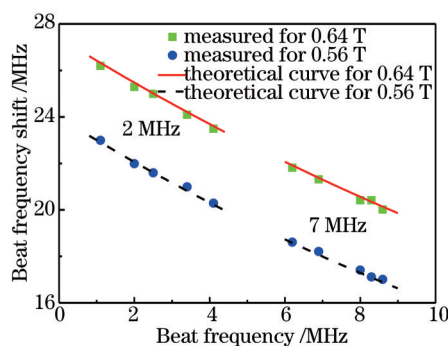


图6 激光器初始拍频为2 MHz和7 MHz时, 改变抽运激光器偏振态调谐拍频频率所测得的磁场作用下拍频频率变化  
Fig.6 Measured beat frequency shift in magnetic field for initial beat frequencies of 2 MHz and 7 MHz with beat frequency tuning by changing the polarization of the pump laser

但是, 由于采用抽运光调谐拍频频率的范围比较小, 一般只有数兆赫兹, 因此调谐能力较为有限。抽运光调谐的优势在于其调谐速度较快。若拍频的调谐范围较大, 则需要结合压力调谐或者二氧化碳激光器热处理等方式来做大范围的拍频频率调谐<sup>[13]</sup>。

## 4 结 论

对基于法拉第效应和正交偏振双频光纤激光器的光纤激光磁场传感器的磁场灵敏度与拍频频率的关系进行了研究。理论和实验结果表明,传感器对磁场的灵敏度与拍频频率间呈非线性关系,并且灵敏度随着拍频频率的减小而增大,同时存在一个由费尔德常数决定的灵敏度上限值。对于实验中基于掺铒光纤制备的短腔光纤激光器,获得了激光器对磁场响应的最大灵敏度  $43 \text{ Hz}/\mu\text{T}$ 。此外,实验表明,通过调谐抽运激光的偏振态,可以动态地调谐传感器对磁场的灵敏度。

## 参 考 文 献

- 1 S T Vohra, L Fabiny, F Bucholtz. Multiplexed fiber optic electric and magnetic field sensors[C]. SPIE, 1994, 2294: 102-113.
- 2 A Mendez, T F Morse, K A Ramsey. Fiber optic electric-field microsensors[C]. SPIE, 1993, 1795: 153-164.
- 3 A Yariv, H V Winsor. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers[J]. Opt Lett, 1980, 5(3): 87-89.
- 4 Zu Peng, Xiang Wanghua, Bai Yangbo, *et al.*. A novel fiber Sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806005.  
祖 鹏, 向望华, 白扬博, 等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0806005.
- 5 J E Lenz. A review of magnetic sensors[C]. IEEE, 1990, 78(6): 973.
- 6 Gao Cunxiao, Zhu Shaolan, Feng Li, *et al.*. An all fiber laser for distributed optical fiber sensor[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1501-1504.  
高存孝, 朱少岚, 冯 莉, 等. 用于分布式光纤传感的全光纤激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1501-1504.
- 7 L Cheng, J Han, Z Guo, *et al.*. Faraday-rotation-based miniature magnetic field sensor using polarimetric heterodyning fiber grating laser[J]. Opt Lett, 2013, 38(5): 688-690.
- 8 Y Zhang, B O Guan, H Tam. Ultra-short distributed Bragg reflector fiber laser for sensing applications[J]. Opt Express, 2009, 17(12): 10050-10055.
- 9 Li Jinming, Ma Youchun, Yan Shubin, *et al.*. High precision and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system based on tunable filter[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905002.  
李锦明, 马游春, 闫树斌, 等. 基于可调谐滤波器的高精度宽量程光栅传感解调系统[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905002.
- 10 Wang Yongjun, Lin Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.  
王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 11 Wang Jufeng, Zhuang Linling, Liu Shiwei, *et al.*. Fiber Bragg grating sensor demodulation technology with high stability by using Sagnac loop filter[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905004.  
王巨锋, 庄琳玲, 刘士伟, 等. 基于光纤 Sagnac 环滤波器的高稳定光纤布拉格光栅传感解调技术[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905004.
- 12 Jianlei Han, Linghao Cheng, Zhenzhen Guo, *et al.*. Sensitivity enhanced magnetic field sensor based on Faraday effect and dual-polarization fiber grating laser[C]. SPIE, 2013, 8924: 89242P-8.
- 13 L Cheng, J Han, L Jin, *et al.*. Sensitivity enhancement of Faraday effect based heterodyning fiber laser magnetic field sensor by lowering linear birefringence[J]. Opt Express, 2013, 21(5): 30156-30162.
- 14 G A Ball, W W Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser[J]. Opt Lett, 1992, 17(6): 420-422.
- 15 G A Ball, G Meltz, W W Morey. Polarimetric heterodyning Bragg-grating fiber-laser sensor[J]. Opt Lett, 1993, 18(22): 1976-1978.
- 16 L Cheng, Z Guo, J Hanet, *et al.*. Ampere force based magnetic field sensor using dual-polarization fiber laser[J]. Opt Express, 2013, 21(11): 13419-13424.
- 17 R Ulrich, A Simon. Polarization optics of twisted single-mode fibers[J]. Appl Opt, 1979, 18(13): 2241-2251.
- 18 M J Freiser. A survey of magneto-optic effects[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1968, 4(2): 152-161.
- 19 M L Lee, J S Park, W J Lee, *et al.*. A polarimetric current sensor using an orthogonally polarized dual-frequency fibre laser[J]. Meas Sci Technol, 1998, 9(6): 952-959.
- 20 B O Guan, L Jin, Y Zhang, *et al.*. Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(8): 1097-1112.

栏目编辑: 王晓琰