

引用格式: LIANG Zhizhuang, HAN Qun, TANG Yuliang, et al. Magnetic Domain Effects and Nonlinear Responses of Magneto-optic Fiber Current Sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0806001

梁志状, 韩群, 唐语良, 等. 磁光型光纤电流传感器中的磁畴效应及非线性响应研究[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0806001

磁光型光纤电流传感器中的磁畴效应及 非线性响应研究

梁志状, 韩群, 唐语良, 张腾, 程振洲

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电技术与光纤传感实验室, 天津 300000)

摘要: 限制磁光晶体型光纤电流传感器实用化的主要因素为磁光响应的非线性问题。其中包括维尔德系数随温度变化导致的磁场与温度交叉串扰问题。为进一步提高传感器精度, 对磁光晶体非线性响应的来源进行了理论和实验研究。研究表明, 在恒温条件下, 磁光响应符合磁畴衍射模型, 通过理论推导证明了非线性误差与磁光晶体的衍射无关, 而与两路光电探测器的电压转换系数失配和起偏器与偏振分束器光轴夹角的装配误差有关。采用二次多项式拟合可以有效减小解调误差, 提高传感器的精度。本文对高精度磁光型光纤电流传感器的研究及其实用化具有重要意义。

关键词: 光纤传感; 光纤电流传感器; 磁光晶体; 磁畴效应; 非线性补偿

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235208.0806001

0 引言

近年来, 随着风/光伏发电等分布式电力系统的快速发展^[1]和高压输配电系统电压等级的不断提高, 传统的电磁式互感器逐渐暴露出许多根本性的不足, 如成本高、绝缘性能差、易发生磁饱和^[2]、稳定性差^[3]等。磁光晶体型光纤电流传感器(Fiber Optical Current Sensor, FOCS)具有尺寸小、动态响应宽^[4]、绝缘性能好、灵敏度高, 以及便于与光纤通讯系统集成实现远距离传感等优点^[5-6], 在分布式电力监控和智能电网建设中具有重要的应用价值^[7-8]。目前限制该类型光纤电流传感器广泛应用的主要障碍是磁光响应的非线性所带来的测量误差问题^[7]。研究磁光晶体的非线性响应的机理和补偿方法, 对提高传感器精度, 实现其实用化具有重要意义。

磁光晶体的维尔德系数会随外界温度发生变化^[9], 导致磁场与温度交叉串扰, 这是影响传感器精度的最主要因素^[10], 也是近年来的研究热点^[11]。为解决该问题, HAN Jiahui等^[12]利用维尔德系数对波长的依赖性, 提出一种双波长解调方法, 并得到了较好的补偿效果。但该方案需要两个波长的光源, 增加了系统的复杂程度。WANG Hongyuan等^[13]通过推导维尔德系数与温度的关系式, 得到了一个拟合度达到0.998 5的补偿模型。测得环境温度后, 可通过该模型计算维尔德系数。MIHAILOVIC P M等^[14]利用磁光晶体的材料特性, 通过测量晶体旋光性的温度系数来同时解调外界温度与电流。该方法结构简单, 无需引入额外传感器, 但精度较低。

除了维尔德系数的温度依赖性导致的非线性误差外, ITOH N等^[15]发现即使在温度恒定时, 磁光晶体的输出与外界磁场之间也并非线性关系。DEETER M N等^[16]进一步发现, 磁光晶体的响应与外磁场之间存在二次关系, 猜测是由于磁畴变化导致的衍射引起了这一现象。JIA Qing等^[17]提出了一种基于直流偏置的温度补偿方法, 研究表明, 温度串扰被有效补偿后磁畴效应导致的误差成为了进一步提高传感精度的

基金项目: 国家自然科学基金(No. 621775179), 天津市自然科学基金(No. 22JCYBJC00090)

第一作者: 梁志状, 2020202171@tju.edu.cn

通讯作者: 韩群, hanqun@tju.edu.cn

收稿日期: 2023-01-02; 录用日期: 2023-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

主要障碍。本课题组最近提出的基于神经网络的高精度补偿算法^[1]可以以较高精度补偿磁光晶体的非线性响应。然而,目前对磁畴效应的影响尚缺少理论推导与实验验证。

本文对磁光晶体的磁畴效应进行了理论模拟和实验表征。研究发现,在恒温条件下,磁光晶体的维尔德系数会随磁场发生轻微的变化,然而该变化的来源并非磁畴导致的衍射现象,而是来源于光电二极管的响应度差异和起偏器与偏振分束器的交角误差。通过实验标定,该非线性可以通过选择合适的非线性拟合方式来予以补偿。此外,还对比了基于二次多项式的非线性解调模型和传统的线性解调模型,前者可以显著降低误差。该补偿方式整体系统无需引入额外装置,结构简单,可满足传感器实时采集要求。

1 理论模型与仿真分析

磁光晶体型光纤电流传感器的结构如图1,一束非偏振光通过输入光纤耦合进入光纤准直器,经起偏器后变为线偏振光,再经过磁光晶体后偏振方向会随待测电流的磁场而变化。经过磁光晶体的出射光被一偏振分束器分为两个偏振方向互相垂直的分量,各自耦合入一条单模光纤输出,送至解调系统中各自对应的光电探测器(Photodetector, PD)被转换为电信号。偏振分束器的偏振方向按照未施加磁场时两束输出光的光强相等予以确定。

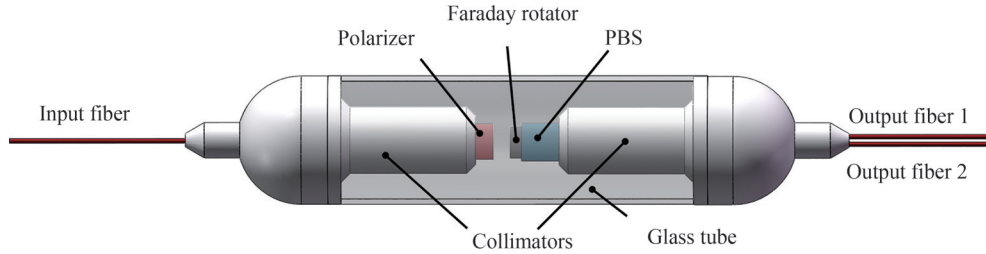


图1 磁光晶体型光纤电流传感器结构
Fig.1 Schematic of the sensor's structure

1.1 理论分析

理想情况下,线偏振光经过磁光晶体时,在外磁场的作用下,其法拉第旋转角 θ 可以表示为

$$\theta = VLB \quad (1)$$

式中, V 表示维尔德常数, L 表示磁光晶体的长度, B 表示待测电流的磁场。VOJNA D等^[18]提出了一种磁光材料的维尔德系数的拟合模型,即

$$V(\lambda, T) = \frac{C_m}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C_p}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)(T - T_p)} + \frac{C_g}{T - T_p} \quad (2)$$

式中, λ 为入射光的波长, λ_0 为主导跃迁波长, C_m, C_p, C_g 需由实验数据拟合得到, T 为外界温度, T_p 为Curie-Weiss温度。通过式(2)可知,磁光材料的维尔德系数与外界温度呈非线性关系。磁光晶体输出的偏振光通过45°偏振分束器后,输出端两个偏振分量的光强可以表示为

$$\begin{cases} I_{\parallel} = I_0 \cos^2(45^\circ - \theta) = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\theta) \\ I_{\perp} = I_0 \cos^2(45^\circ + \theta) = \frac{I_0}{2} (1 - \sin 2\theta) \end{cases} \quad (3)$$

式中, I_0 为两个偏振分量的总光强, I_{\parallel} 和 I_{\perp} 分别为两个偏振分量的光强。两路输出光的光强之和与光强之差分别为

$$\begin{cases} I_{\text{DIFF}} = I_{\parallel} - I_{\perp} = I_0 \sin 2\theta \\ I_{\text{SUM}} = I_{\parallel} + I_{\perp} = I_0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,两束光的光强度之差与法拉第旋转角呈正弦函数关系,而两束输出光的光强之和为常量

I_0 。将式(4)中两式相除并求其反正弦,即可根据测得的两路光的光强解调出法拉第旋转角

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{I_{\text{DIFF}}}{I_{\text{SUM}}}\right) \quad (5)$$

再根据式(1),即可解调出待测电流的磁场 B 。由于 I_0 在差除和计算中被消除,该方案可以避免光源功率波动的影响。

实际情况下, L 会因热胀冷缩引入误差, V 也并非常数,而是会随温度变化,所以必须进行温度补偿^[17]。即使在恒温条件下, V 也并非常数,而是会随磁场发生一定的变化。该变化虽然轻微,但在高精度电流传感等应用中却不可忽视。

图1所示的光纤电流传感器中所用的磁光晶体为铋置换稀土石榴石晶体薄膜,其存在两个与其表面正交的迷宫形磁畴^[20],磁光晶体薄膜结构如图2(a)。线偏振光经过这两个磁畴时偏振方向会发生相反旋转,如图2(b)。当垂直于薄膜表面方向施加的磁场强度增大时,一个方向的磁畴增强,另一个方向的磁畴减弱,直至饱和磁场下,一个方向的磁畴完全消失。在饱和前它相当于一个随磁场强度变化的相位光栅,不同衍射级次的偏振态和相对强度都会随磁场而变化。为了便于讨论,将这一现象称为磁畴效应^[21]。本文基于衍射理论,推导演射光的光强与磁畴效应的关系。

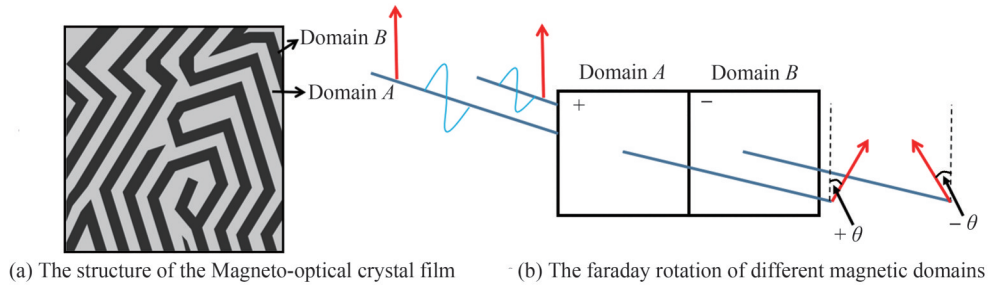


图2 偏振光通过不同方向磁畴时的旋转角

Fig.2 Rotation angle of polarized light through magnetic domains in different directions

进入磁光晶体的线偏振光可分解为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的叠加,传播过程的光电场表达式为

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) = \frac{1}{2} E_0 e^{i(\omega t - kz)} + \frac{1}{2} E_0 e^{-i(\omega t - kz)} \quad (6)$$

式中, $E_0 = \sqrt{I_0}$ 为入射光场的初始振幅, t 为时间, z 为传播距离。传播过程中两圆偏振光的磁光相移反向。因此当两圆偏振光经过磁畴A和磁畴B后,输出光的振幅表达式为

$$\begin{cases} E_A = \frac{1}{2} E_0 (e^{i\omega t + i\theta} + e^{-i\omega t + i\theta}) = E_0 \cdot e^{i\theta} \cdot \cos \omega t \\ E_B = \frac{1}{2} E_0 (e^{i\omega t - i\theta} + e^{-i\omega t - i\theta}) = E_0 \cdot e^{-i\theta} \cdot \cos \omega t \end{cases} \quad (7)$$

式中, θ 为磁光相移,即法拉第旋转角。将磁光晶体薄膜视作一个相位光栅,仅考虑一个周期的衍射光强,假设磁畴周期为 l ,磁场为 B_c 时磁畴A的占比为 m ,即磁畴A的宽度为

$$l_A = ml = \frac{l}{2} \left(1 + \frac{B_c}{B_{\text{sat}}}\right) \quad (8)$$

在外磁场为0时 $m=0.5$,此时两个方向的磁畴宽度相等。当外磁场达到饱和磁场强度 B_{sat} 时 $m=1$,即此时磁畴B消失。对一个磁畴周期进行傅里叶积分,可得各级衍射光的振幅

$$\begin{cases} C_M = \frac{1}{l} \left[\int_{-\frac{l}{2}}^{-\frac{l}{2} - ml} E_A e^{-i\left(\frac{2\pi M}{l}\right)\xi} d\xi + \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} E_B e^{-i\left(\frac{2\pi M}{l}\right)\xi} d\xi \right] \\ C_0 = E_B + m(E_A - E_B) \end{cases} \quad (9)$$

式中, M 为衍射级次, C_0 为0级衍射的傅里叶系数,即0级衍射的振幅。将式(7)代入式(9),并通过时间平均消除 $\cos \omega t$,可得0级衍射振幅的表达式为

$$C_0 = E_0 [\cos \theta + i(1 - 2m) \sin \theta] \quad (10)$$

可见,零级光由两个正交的偏振分量叠加而成,它们的光强分别表示为

$$\begin{cases} I_y = I_0 \cos^2 \theta \\ I_x = I_0 (1 - 2m)^2 \sin^2 \theta \end{cases} \quad (11)$$

其中一个分量不受磁畴效应的影响,另一个则随 m 而变。考虑到图 2(a) 所示的迷宫结构,在任意局部区域入射线偏光总可以分解为沿迷宫通道的分量和垂直于迷宫通道的分量,只有垂直于迷宫通道的分量会受到相位调制发生衍射。上述分析过程相当于把迷宫结构拉直,等效为一系列平行狭缝,平行于狭缝的等效偏振分量不受磁畴效应的影响,而垂直于狭缝的等效偏振分量则会发生随磁场而变化的衍射。

零级衍射光经过一个与入射线偏光偏振方向成 45° 的偏振分束器被分别耦合入一条输出光纤,最后分别经光电二极管 PD1 和 PD2 转换为电信号。如图 3,利用马吕斯定律,PD1 和 PD2 中接收到的光强应为磁光晶体零级衍射光中两个偏振分量的叠加,最终得到的光电压可表示为

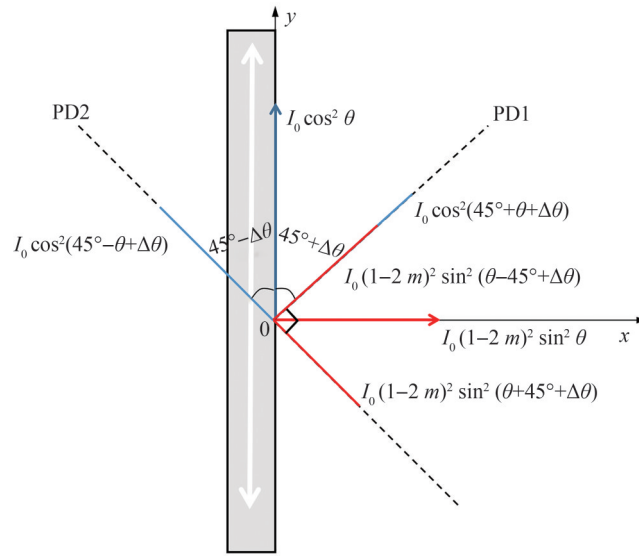


图3 经过分束器后的光强的叠加图

Fig.3 Superposition of light intensity after passing through the PBS

$$\begin{cases} V_{\parallel} = k_1 I_0 [\cos^2(\theta - 45^\circ + \Delta\theta) + (1 - 2m)^2 \sin^2(\theta + 45^\circ + \Delta\theta)] \\ V_{\perp} = k_2 I_0 [\cos^2(\theta + 45^\circ + \Delta\theta) + (1 - 2m)^2 \sin^2(\theta - 45^\circ + \Delta\theta)] \end{cases} \quad (12)$$

式中, k_1 和 k_2 为两路探测器的电压转换系数,主要与光电二极管的响应度和转换电路的参数有关。 $\Delta\theta$ 为起偏器的偏振方向与偏振分束器的光轴夹角的调整误差。此时两路信号的和信号与差信号可以表示为

$$\begin{cases} V_{\text{diff}} = \frac{I_0}{2} (1 + (1 - 2m)^2) [k_1 - k_2 + (k_1 + k_2) \sin(2(\theta + \Delta\theta))] \\ V_{\text{sum}} = \frac{I_0}{2} (1 + (1 - 2m)^2) [k_1 + k_2 + (k_1 - k_2) \sin(2(\theta + \Delta\theta))] \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)与式(4)对比可以发现,考虑磁畴效应时,磁光晶体输出的差信号与和信号均为非线性函数,此时通过差除和计算得到的法拉第偏转角 θ_{calc} 的表达式为

$$\theta_{\text{calc}} = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{V_{\text{diff}}}{V_{\text{sum}}}\right) = \frac{1}{2} \arcsin\left[\frac{k_1 - k_2 + (k_1 + k_2) \sin(2(\theta + \Delta\theta))}{k_1 + k_2 + (k_1 - k_2) \sin(2(\theta + \Delta\theta))}\right] \quad (14)$$

通过式(14)可以看出,采用双路解调法得到的法拉第旋转角不包含衍射相关的 m 项,磁畴效应导致的衍射光强变化被抵消,因此该方法不但可以消除光源功率波动造成的误差,同时还可以消除磁畴效应导致的磁光晶体的非线性响应。此外,如果采样电路参数调整存在误差 ($k_1 \neq k_2$) 或传感器装配时存在光轴对准误差 ($\Delta\theta \neq 0$),则按式(14)得到的解调结果会表现出轻微的非线性。

1.2 数值仿真结果与讨论

基于上述理论模型,对磁畴效应的影响进行了模拟分析。图4(a)和(b)分别为根据式(3)和式(12)计算得到的考虑磁畴效应和不考虑磁畴效应时,两路PD探测到的电压信号与磁场之间的关系曲线。考虑磁畴效应情况下,假设 $\Delta\theta=0.2^\circ$,两个光电二极管的响应度系数为 $k_1:k_2=1:0.98$ 。可以看出,两种情况下对应曲线的变化趋势是相同的,但变化规律存在一定的差异。两图中PD2输出电压曲线差异不明显,但PD1曲线则存在显著差异,考虑磁畴效应时电压变化范围更大,曲线明显偏离正弦函数。

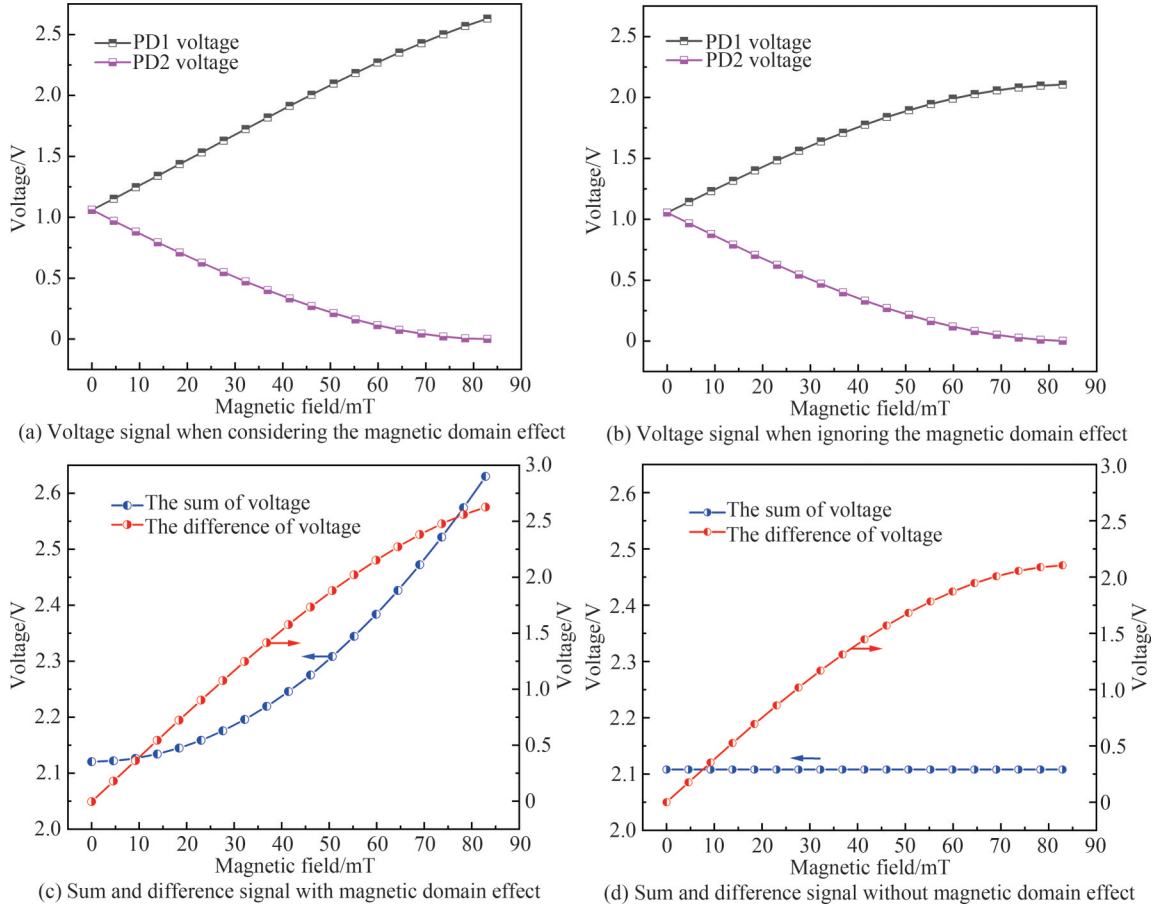


图4 输出电压与磁场的关系曲线
 Fig.4 Voltage signals as function of magnetic field

考虑磁畴效应和不考虑磁畴效应情况下的和信号与差信号分别如图4(c)和4(d)。根据式(4),和信号应为定值,差信号与磁场之间满足标准的正弦关系。在考虑磁畴效应的情况下,根据式(13),和信号不再为定值。当理想情况下,即 $\Delta\theta=0^\circ, k_1=k_2$ 时,磁光晶体输出的和信号与差信号的表达式为

$$\begin{cases} I_{\text{DIFF}} = I_0 [1 + (1 - 2m)^2] \sin 2\theta \\ I_{\text{SUM}} = I_0 [1 + (1 - 2m)^2] \end{cases} \quad (15)$$

可以看出,磁畴效应导致和信号与磁场之间呈二次函数关系;差信号与磁场间虽仍为正弦关系,但幅值却是随磁场变化的。理想情况下,将式(15)两式相除,得到的结果与式(5)相同,所以磁畴效应不会引入测量误差, θ 与 B 之间仍为线性关系。但实际情况下,由于很难保证 $\Delta\theta=0$ 且 $k_1=k_2$,仍按式(5)解调得到的 θ 与 B 之间将呈现出轻微的非线性。图5为 $\Delta\theta=0.2^\circ$ 且 $k_1:k_2=1:0.98$ 时的模拟结果与理想情况的对比,很好地证明了这一结论。

从上述分析可以看出,为了减小解调结果的非线性,一方面应尽可能保证 $k_1=k_2$,这通常可以通过选择响应度一致的PD或精确调整取样电阻来实现。另一方面,传感器装配时应尽可能减小角度误差。实际中要调整起偏器的起偏方向与偏振分束器的光轴严格呈 45° 是不现实的。如果不予以合理补偿,仍按式(5)解

调,则会导致测量误差。由于式(14)无法解析求解,因此实践中可以采用对传感器进行实验标定并对标定数据进行非线性拟合的方式来降低非线性响应导致的解调误差。

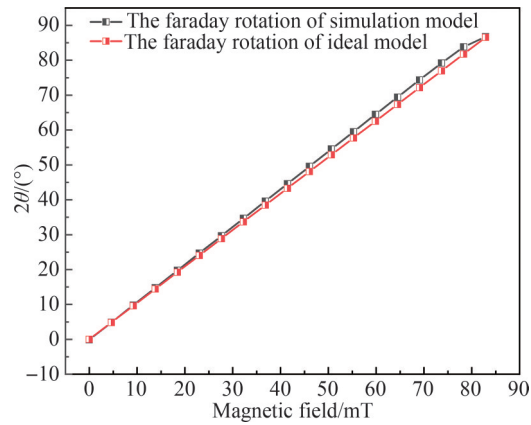


图5 法拉第旋转角与磁场的关系曲线

Fig.5 Faraday rotation angle as a function of magnetic field

2 实验验证与分析

为验证上述理论分析得到的规律,进行了实验研究。实验系统原理如图6。光源采用的是放大自发辐射(Amplified spontaneous emission, ASE)宽带光源。待测电流的磁场由高精度电流源驱动的螺线管产生。为了得到均匀且稳定的磁场,采用了两个相同的螺线管,二者平行放置,传感器置于二者之间狭缝处的管轴位置。经实验标定,磁场 B 与电流 I 成线性关系 $B=9.21I$ 。实验中通过调节高精度电流源来改变磁场,调节范围 $0\sim 9$ A,间隔为 0.5 A。高斯计(CH-1500,精度为 0.01 mT)用于实时监测螺线管产生的磁场。为了排除温度的影响,传感器与螺线管被置于控温精度为 ± 0.3 °C的温箱中,实验中温度控制在 25 °C。传感器的输出信号由两个几乎完全相同的PD(InGaAs光电探测器)进行光电转换。在MCU的控制下由24位ADC模块完成数据采集并通过串口发送到计算机。

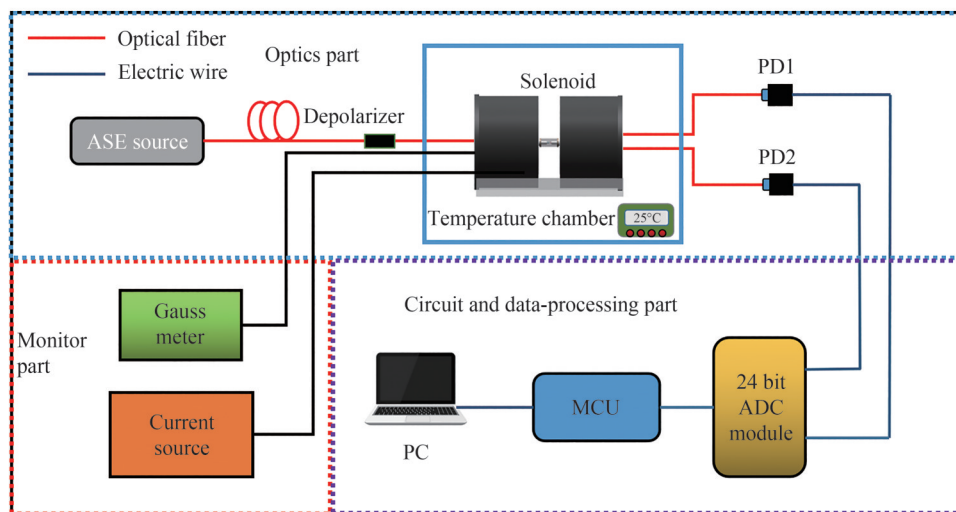


图6 实验装置示意

Fig.6 Schematic of the experimental setup

数据采集模块得到的两路信号电压随磁场的变化如图7(a),相应的和信号和差信号曲线如图7(b)。从图7(a)可以看出,经ADC模块采样得到的两路信号初始电压相等。随着磁场的增强,一路信号增强,另一路信号减弱。在磁场达到 78 mT时,两路信号不再随磁场的变化而变化,说明磁光晶体出现了饱和。曲线

的变化趋势与模拟结果(图4(a))基本一致。从图7(b)可以看出,和信号与磁场呈明显的非线性关系,其结果与图4(c)也基本符合。差信号则表现出与磁场间良好的线性关系。分析原因,根据式(15),在饱和磁场范围内 $\sin 2\theta$ 为凸函数($\theta < 45^\circ$),而其前面的乘数项即为 I_{SUM} ,根据图4(c)可知该项为凹函数,二者相乘导致输出近似呈现线性关系。然而由于仿真过程忽略了晶体的透射率及损耗等影响,因此图4(c)中的差信号仍表现出一定的凸函数效果。对比图(7)和图(4)可以看出,考虑磁畴效应的模型公式(13)更符合实际情况。

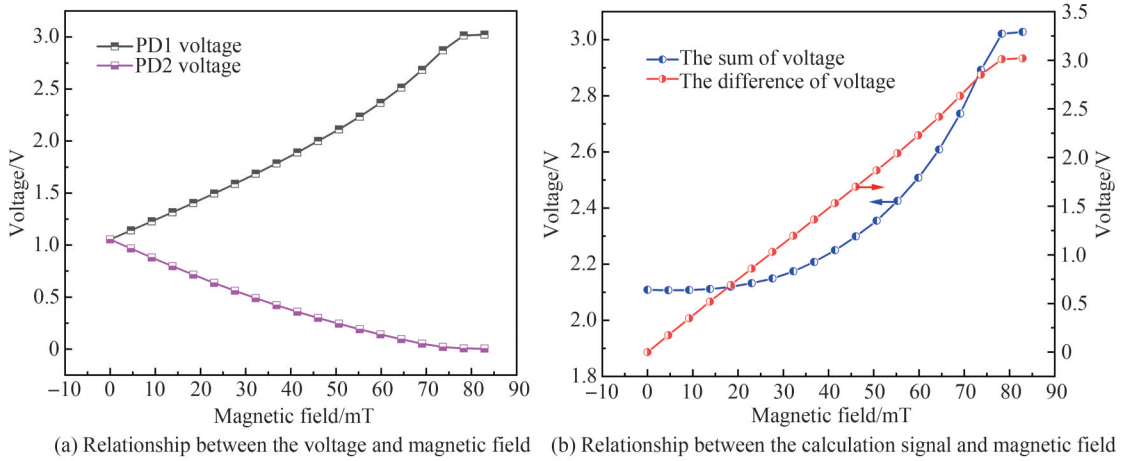


图7 实验测得的信号标定曲线
Fig.7 Signal calibration curve measured by experiment

同时改变温箱温度,测量了 $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内,间隔为 10°C 的磁光晶体的维尔德系数。由于磁光晶体的维尔德系数 V 及其尺寸 L 均会随外界温度而改变,因此将二者合并为一个变量 VL 。 VL 与外界温度的关系曲线如图8,可以发现二者表现出反比例关系,这与式(2)相符合。并且通过图8可以看出 VL 随外界温度影响变化较大,因此温度补偿十分重要。文献[17]和[19]中对温度的影响及其补偿方法进行了详细的讨论。

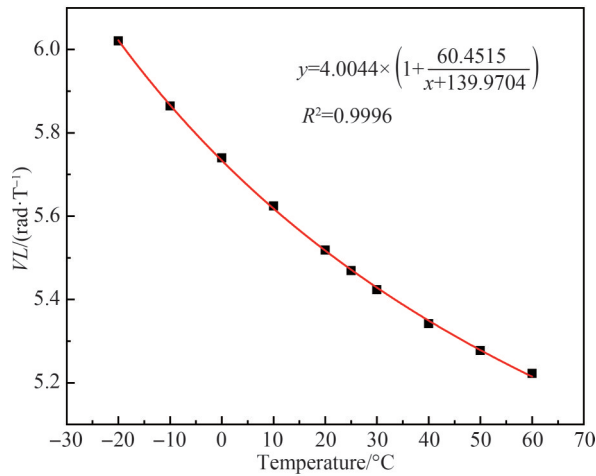


图8 实验测量的 VL 与外界温度关系
Fig.8 The relationship between the VL measured by experiment and the temperature

图9是 25°C 下根据实验结果计算出的法拉第旋转角与磁场之间关系。整体仍表现为较好的线性关系。但图中的线性拟合与二次多项式拟合却揭示出二者之间存在着轻微的非线性。线性拟合的残差平方和为 15.649 4,二次多项式拟合的残差平方和为 3.816 7。显然非线性拟合更符合实验数据的变化规律。为了更好地对比线性拟合与非线性拟合对误差的影响,图10给出了基于4种误差模型的误差分析结果,分别为平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error,

MAE)、最大误差(Maximum Error, ME)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。各种误差的定义式分别为

$$\delta_{\text{MAPE}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (16)$$

$$\delta_{\text{MAE}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - \hat{y}_i| \quad (17)$$

$$\delta_{\text{ME}} = \max(|y_i - \hat{y}_i|) \quad (18)$$

$$\delta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (19)$$

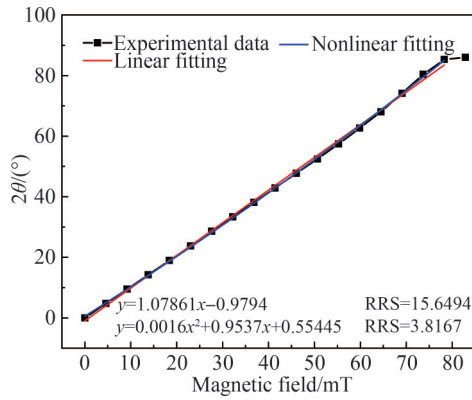


图9 实验测量的法拉第旋转角与外磁场关系

Fig.9 The relationship between the rotation angle measured by experiment and magnetic field

图10中四种误差模型结果表明非线性拟合的误差均小于线性拟合。这说明考虑到光纤电流传感器的非线性响应,基于非线性模型来解调有利于降低误差、提高传感器的解调精度。在实际应用时,经过多次实验发现,在未施加磁场时,通过调节两路信号的放大倍数使其初始转换电压相等,即通过调整放大倍数来补偿掉初始的装配角误差时,传感器输出效果最好。此时通过实验数据标定传感器的非线性规律,并通过求解二次函数得到外界磁场,可以明显提升传感器精度。

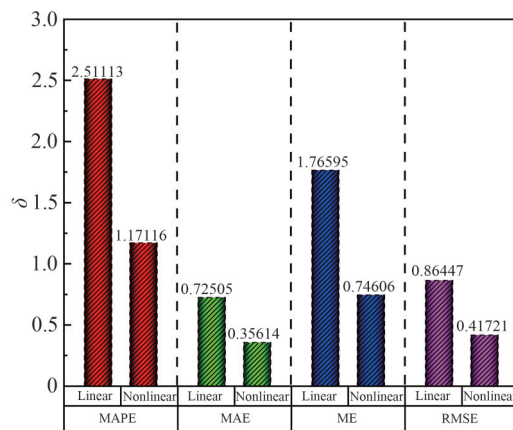


图10 基于四种误差模型的解调精度对比

Fig.10 The accuracy comparison of four error models

3 结论

本文针对磁光晶体型光纤电流传感器的非线性响应问题,对磁光晶体的磁畴效应进行了理论分析和实验验证。研究表明,在恒温条件下,传感器的两路输出符合磁畴效应模型。并且采用双路解调方法,不

但可以消除光源功率波动的影响,还可以消除磁畴效应对磁光晶体的非线性影响。造成传感器磁光响应非线性误差的主要原因是解调电路电压转换系数的失配和传感器装配时起偏器与偏振分束器光轴方向夹角的调整误差。该非线性在宏观表现上虽看似轻微,但在精度要求较高的情况下,却是影响传感器性能的关键。本文通过对比二次多项式的非线性拟合函数和传统的线性拟合函数,证明了非线性拟合能够进一步提高传感器的解调精度,后续可以采取其他非线性补偿模型或智能算法对该非线性进行补偿。

参考文献

- [1] LENNER M, FRANK A, YANG L, et al. Long-term reliability of fiber-optic current sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(2): 823-832.
- [2] ZHANG Xuan, HAO Peng, SU Ya, et al. Research on three-dimension fiber optica vector magnetic field sensor based on magneto-optical crystal[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023: 1-11.
张轩,郝鹏,苏亚,等.基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器研究[J/OL].*激光与光电子学进展*,2023:1-11.
- [3] XIAO Dongrui, WANG Guoqing, YU Feihong, et al. Highly stable and precise demodulation of an FBG-based optical current sensor using a dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5962-5972.
- [4] WU Jianhua, ZHANG Xiaofeng, CHEN Liang, et al. Research progress of all-fiber optic micro-current sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17): 54-64.
吴健华,张晓峰,陈亮,等.全光纤微电流传感器研究进展[J].*激光与光电子学进展*,2022,59(17):54-64.
- [5] WANG Meirong, ZHOU Wangmin, ZHANG Peng, et al. Investigations of magneto-optical properties of BGO crystal utilized for optical fiber current sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 100-104.
王美蓉,周王民,张鹏,等.用于光纤电流传感器的BGO晶体磁光特性研究[J].*光子学报*,2006,35(1):100-104.
- [6] LOPEZ J D, DANTE A, CREMONEZI A O, et al. Fiber-optic current sensor based on FBG and Terfenol-D with magnetic flux concentration for enhanced sensitivity and linearity [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(7): 3572-3578.
- [7] LIU Chi, SHEN Tao, WU Haibin, et al. Applications of magneto-strictive, magneto-optical, magnetic fluid materials in optical fiber current sensors and optical fiber magnetic field sensors: A review [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 65(1): 1-19.
- [8] YU Wenbin, ZHANG Guoqing, LU Zhongfeng, et al. Analysis of resistance disturbance capability of optical current transformers[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(12): 8-12.
于文斌,张国庆,路忠峰,等.光学电流互感器的抗干扰分析[J].*电力系统保护与控制*,2012,40(12):8-12.
- [9] CAI Wei, XU Youan, YANG Zhiyong, et al. Discussion on verdet constant solution model of paramagnetic magneto-optical materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(20): 289-297.
蔡伟,许友安,杨志勇,等.顺磁性磁光材料维尔德常数解算模型的讨论[J].*物理学报*,2019,68(20):289-297.
- [10] SLEZÁK O, YASUHARA R, LUCIANETTI A, et al. Temperature-wavelength dependence of terbium gallium garnet ceramics verdet constant [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(11): 3683-3691.
- [11] SLEZÁK O, YASUHARA R, VOJNA D, et al. Temperature-wavelength dependence of verdet constant of Dy₂O₃ ceramics [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(7): 2971-2981.
- [12] LIU Tiegeng, HAN Jiahui, HU Haofeng. Optical current sensor with dual-wavelength configuration for improving temperature robustness [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-10.
- [13] WANG Hongyuan, JIANG Junfeng, HU Haofeng, et al. Temperature compensation of optical alternating magnetic field sensor via a novel method for on-line measuring [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13682-13693.
- [14] MIHAILOVIC P M, PETRICEVIC S J, RADUNOVIC J B. Compensation for temperature-dependence of the faraday effect by optical activity temperature shift [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(2): 832-837.
- [15] ITOH N, MINEMOTO H, ISHIKO D, et al. Small optical magnetic-field sensor that uses rare-earth iron garnet films based on the faraday effect [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(10): 2047-2052.
- [16] DEETER M N. Domain effects in faraday effect sensors based on iron garnets [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(4): 655-658.
- [17] JIA Qing, HAN Qun, LIANG Zhizhuang, et al. Temperature compensation of optical fiber current sensors with a static bias [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(1): 352-356.
- [18] VOJNA D, DUDA M, YASUHARA R, et al. Verdet constant of potassium terbium fluoride crystal as a function of wavelength and temperature[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1683-1686.
- [19] LIANG Zhizhuang, HAN Qun, ZHANG Teng, et al. Nonlinearity compensation of magneto-optic fiber current sensors based on WOA-BP neural network [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(20): 19378-19383.
- [20] NUMATA T, TANAIKE H, INOKUCHI S, et al. Nonlinearity of faraday loops [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1990, 26(5): 1-3.
- [21] KUHLOW B, LAMBECK M. Light diffraction by magnetic domains [J]. *Physica*, 1975, 80(1): 374-380.

Magnetic Domain Effects and Nonlinear Responses of Magneto-optic Fiber Current Sensors

LIANG Zhizhuang, HAN Qun, TANG Yuliang, ZHANG Teng, CHENG Zhenzhou
(Laboratory for Optoelectronic Technology and Optical Fiber Sensing, School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000, China)

Abstract: With the rapid increase of electrical power demand, the voltage level of power grid also improved. The traditional current transformer is difficult to meet the needs of power grid because of its easy saturation, poor insulation, narrow frequency band, etc. The optical fiber current sensor can solve these problems. Therefore, it has wide application prospects in power monitoring and smart grid construction. However, the nonlinear response of magneto-optical crystal is the main factor that limits the application of the magneto-optic fiber current sensor. Nowadays, research on the nonlinear error of the Fiber Optical Current Sensors (FOCS) mainly focuses on the nonlinear dependence of the Verdet coefficient of the Magneto-optical (MO) materials on the external temperature. The change of Verdet coefficient will lead to the crosstalk of magnetic field and temperature, which is one of the main factors limiting the practical application of the FOCS. Nevertheless, when the temperature is fixed, the output signals of the MO materials is also not changed linearly with change of the external magnetic field. To improve the accuracy of the sensors, we studied the source of the nonlinear response of the MO crystal theoretically and experimentally. In this paper, we demarcated the output curve of garnet crystal from no magnetic field to saturated magnetic field. Through simulation and experiment, we proved that the nonlinear response of MO fiber optical current sensor is caused by the diffraction characteristics of magnetic domain of the MO material. The model of magnetic domain effect proposed by us conforms to the output response of the MO sensors. Through the dual-channel demodulation method, we can calculate the intensity of the output light through the 45° polarization beam splitter according to Malus law. And we obtain the Faraday rotation angle according to the demodulation algorithm of difference division sum. The theoretical results show that the influence of nonlinear error caused by magnetic domain effect can be ignored with the method of the two-channel demodulation. And in this way, the influence of light source fluctuation can be eliminated. Simulation and experimental results show that the nonlinear error at a fixed temperature is mainly due to the voltage conversion coefficient mismatch of the two photodetectors and the assembly error of angle between polarizer and polarization beam splitter. Although the nonlinearity seems slight in macro performance, it is the key to affect the performance of the sensors in the case of high accuracy requirements. When the temperature changes, the nonlinear error of the MO materials is mainly due to the temperature dependence of Verdet coefficient on temperature. In order to solve the above problems and improve the accuracy of the MO fiber optical current sensor, we propose a nonlinear compensation model based on quadratic fitting. By comparing the four error models between the compensation model and the traditional demodulation model, the experimental results show that this method has good fitting accuracy and is suitable for nonlinear compensation of FOCS based on the MO material. In the actual experiment, we adjust the two magnifications to make the two conversion signals equal without applying the magnetic field. It means that the initial assembly angle error is compensated by adjusting the magnification. In this case, the result of the sensor output is the best. After that, the nonlinear law of the sensor is calibrated by the experimental data, and the external magnetic field is obtained by solving the quadratic function, which can significantly improve the accuracy of the sensor. This method has a simple structure and high fitting precision, and can meet the real-time acquisition of the MO fiber optical current sensor.

Key words: Optical fiber sensing; Optical fiber current sensor; Magneto-optical crystal; Magnetic domain effect; Nonlinear compensation

OCIS Codes: 260.2370; 140.3510; 160.3820; 190.4400; 230.2240