

文章编号: 0258-7025(2003)11-1011-04

高精度度光纤磁场传感器的研究

周胜军, 张虎城, 李玉权

(解放军理工大学通信工程学院光纤通信实验室, 江苏 南京 210007)

摘要 分析了基于法拉第效应的高精度光纤磁场传感器的理论基础和偏振结构, 选择了灵敏度高、动态范围大的磁光晶体, 并采用计算机模拟技术优化设计和评估性能, 在 2 GHz 的频率范围内, 实验结果与计算机模拟结果是一致的。

关键词 传感器技术; 光纤传感; 磁场传感; 法拉第效应

中图分类号 TP 212.14 文献标识码 A

Research on High Precision Fiber Magnetic Field Sensor

ZHOU Sheng-jun, ZHANG Hu-cheng, LI Yu-quan

(Institute of Communications Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract In this paper, the theoretical base and polarized optical configurations are analyzed, a magneto-optic crystal with high sensitivity and wide frequency response range is chosen, computer simulation techniques are used to verify the optimum sensor design and components capability. Experiment results indicate good agreement between measurements and simulation at frequencies up to 2 GHz.

Key words sensor technique; fiber sensing; magnetic field sensing; Faraday effect

近年来, 基于法拉第旋光效应的光纤磁场传感器得到快速发展, 磁光晶体在传感器中用作传感元件^[1]。实验表明, 经过激光脱沉技术生长的 CdMnTe 晶体具有很高的韦尔代(Verdet)常数; 经合成的 Ga:YIG 晶体与纯钇铁石榴石[YIG]相比, 不仅减少了饱和磁化强度, 而且进一步提高了灵敏度, 最小探测磁场达到 $100 \text{ PT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[2]。由于法拉第型传感器的传感头结构简单, 无需外加电源且不涉及电流传导, 所以传感器具有尺寸小、精度高、灵敏度好、动态范围大和响应快速的优点, 适合于高电压电缆的故障检测、大型变压器泄漏磁通的测量以及在需要电火花防护的危险环境下测量磁场^[3]。

1 光纤磁场传感器的理论基础与偏振结构

当线偏振光在磁光晶体中传播时, 如果晶体周

围的磁场发生变化, 光的偏振面也会相应旋转, 其旋转角度与光传播方向上的磁场分量密切相关, 偏振面旋转角 ϕ 可以表示为^[3]

$$\phi(x, \lambda, T) = V(x, \lambda, T) \int H dl \quad (1)$$

式中的 λ 为真空中的光波长, T 为传感元件周围的温度, V 为磁光晶体的 Verdet 常数, 它与晶体中掺杂金属离子的浓度 x , 绝对温度 T 和光波长 λ 有关; H 为光信号传播方向上的磁场强度。对于均匀的磁场分布, 公式(1)可简化为

$$\phi(x, \lambda, T) = V(x, \lambda, T) \cdot H \cdot l \quad (2)$$

基于法拉第效应的光纤磁场传感器的偏振光学结构如图 1 所示, 偏振器的磁偏振角为 $\theta = \pi/4$ 。半导体激光器输出的光信号经过偏振片时, 偏振面旋转 $\pi/4$, 使光信号处于线偏振状态; 再经过保偏光纤传输到位于被测区的传感头, 经过处于磁场中的磁光晶体的偏振调制, 使线偏振光的方位角旋转; 输出偏振光通过偏振分束器时, 分为偏振角为 0 和 $\pi/2$

收稿日期: 2002-05-21; 收到修改稿日期: 2002-09-19

作者简介: 周胜军(1971—), 男, 解放军理工大学通信工程学院博士研究生, 主要从事光纤通信和光纤传感技术的研究。

E-mail: zsj_413121@etang.com

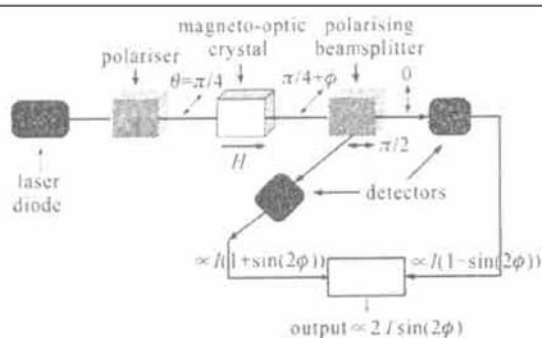


图1 磁光传感器的结构图

Fig. 1 Schematic of magneto-optic sensor

的两束线偏振光, 分别由两个光电探测器接收^[4]。通过测量探测器的输出电流, 可计算磁光晶体偏振面的旋转角度, 进而计算出被测磁场 H 。根据马吕斯定律, 经偏振分束器后两个正交的偏振态的光强分别为

$$I_1 = I_0 \cos^2(\pi/4 + \phi) \quad (3)$$

$$I_2 = I_0 \sin^2(\pi/4 + \phi) \quad (4)$$

I_0 为线偏振光经过磁光晶体调制后的光强, I_1, I_2 分别为 I_0 在垂直偏振轴和水平偏振轴上的光强分量, 则两个探测器输出的电信号分别为

$$i_1 = R_1 I_0 \cos^2(\pi/4 + \phi) \quad (5)$$

$$i_2 = R_2 I_0 \sin^2(\pi/4 + \phi) \quad (6)$$

其中, R_1 和 R_2 分别为两个探测器的响应度。在理想情况下, 假定 $R_1 = R_2 = R$ 。由(5)和(6)式可得到合成后的信号 i

$$i = i_1 - i_2 = RI_0 \sin 2\phi \quad (7)$$

对于均匀的磁场分布, 根据公式(2)和(7), 被测磁场强度 H 可以用下式得到^[5]

$$H = \frac{1}{V(x, \lambda, T) \cdot l} \arcsin \left(\frac{i}{RI_0} \right) \quad (8)$$

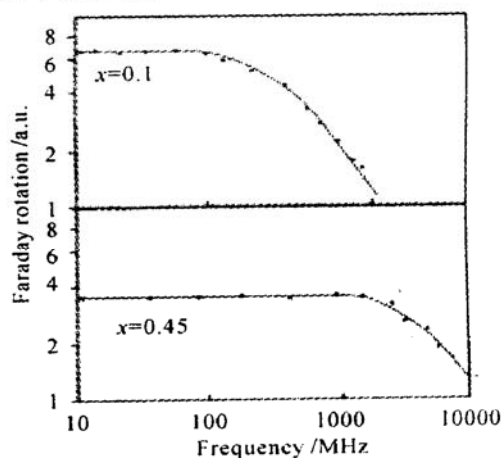
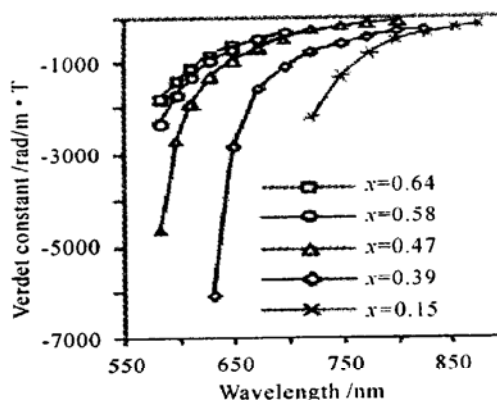
2 晶体的选择

传感头中磁光晶体的性能对传感器的灵敏度、频率特性、动态范围起着决定性的作用。磁光晶体的选择标准是: 晶体应具有良好的旋光性能、频率响应特性和较低的光损失。

通常用 Verdet 常数来表示磁光材料的旋光性能, 其数值随着磁光材料中掺杂的金属离子的种类和浓度的不同而有所不同。经过对各种材料进行比较, 确定了 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体作为磁光传感元件, 该晶体的最佳工作波长为 650 nm。

虽然 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体的 Verdet 常数在待选的

晶体中并不是最大的, 但是该晶体光损失低、热导性好, 而且频率响应范围可达 2 GHz, 该晶体的频率响应如图 2 所示, x 表示晶体中掺杂 Mn^{3+} 离子的浓度。当 $x < 0.5$ 时, 晶体的光学结构呈现最佳的各向同性, 晶体具有较好的频率响应特性。由图可见, 当 $x = 0.1$ 时, 晶体在小于 100 MHz 范围内有较好的频率响应, 当 $x = 0.45$ 时, 晶体在小于 2 GHz 的范围内有较好的频率响应。两者相比, $x = 0.1$ 时晶体的旋光效应大于 $x = 0.45$ 时的旋光效应, 但频率响应范围不如后者。

图2 在两种不同锰浓度 (x) 下, 磁场频率与 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体法拉第效应的关系Fig. 2 Magnetic field frequency dependence of Faraday rotation in $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ for two values of the manganese concentration (x)图3 在不同的锰浓度 (x) 下, 光波长与 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体法拉第旋光效应的关系Fig. 3 Optical wavelength dependence of Faraday rotation in $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ for several values of x

晶体中锰离子浓度 x 不同时, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 磁光晶体的 Verdet 常数和波长的关系如图 3 所示。由图

可见,随着晶体中离子掺杂浓度增大,晶体的 Verdet 常数的绝对值逐渐减少;对于掺杂浓度一定的晶体,当光波长增加时,晶体的 Verdet 常数绝对值逐步减小。虽然 $x = 0.47$ 时的晶体的 Verdet 常数小于 $x = 0.39$ 时,但是当 $x = 0.47$ 时晶体具有更好的频率特性,所以选择 Mn^{3+} 离子掺杂浓度 $x = 0.47$ 的 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 磁光晶体。

3 计算机模拟

在计算机模拟过程中,采用了琼斯积分光学传递函数矩阵来优化磁光晶体的选择和系统设计。矩阵的输出矢量包含了沿光路所有元器件的传递特性,输出的矢量乘上它的复共轭可得到输出信号的强度。输出矢量的表达式由(9)式给定

$$[O] = J_A \cdot J_{xtl} \cdot J_w \cdot [I] \dots \quad (9)$$

其中, $[O]$ 为输出矢量,表示为 $\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix}$; 检偏分束器

的琼斯矩阵 $J_A = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$; 1/4波片的琼斯矩

阵 $J_w = \begin{bmatrix} e^{i\pi/2} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $[I] = \begin{bmatrix} A e^{i\omega t} \\ A e^{i(\omega t + \phi)} \end{bmatrix}$, ϕ 为光波在 x, y 方向的相位差; 传感头的琼斯矩阵 $J_{xtl} = \begin{bmatrix} \alpha + i\beta & -\gamma \\ -\gamma & \alpha + i\beta \end{bmatrix}$, 其中 $\alpha = \cos\left[\frac{1}{2}KL\right]$, $\beta = \frac{\delta}{2K} \sin\left[\frac{1}{2}KL\right]$, L 为晶体在光传播方向上的长度, K 为两正交偏振光在磁光晶体中单位长度的相位差。

模拟结果显示了传感器的归一化传递特性。图4给出了三种情况下的输出曲线。Ideal 曲线是所有元件不存在误差,光学元件之间完全对准的情况。

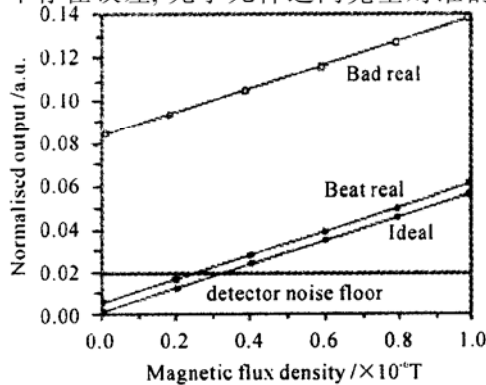


图4 磁光传感器的模拟结果
Fig. 4 Magnetooptic sensor simulation results

Best real 曲线是采用质量较好的晶体, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体 ($x = 0.47$) 固有线形磁滞为 $\pi/20$, 消光比 ≥ 25 dB, 附加损耗 ≤ 0.5 dB; 光学元件之间对准误差 $\leq \pm 2^\circ$ 。在这种情况下,和理想情况下灵敏度的差异只有 0.02%。

Bad real 曲线是采用质量较差的晶体。晶体的固有线形磁滞为 $\pi/8$, 消光比 ≥ 30 dB, 附加损耗 ≤ 1 dB; 光学元件之间对准误差 $\leq \pm 3^\circ$ 。在这种情况下,和理想条件下的灵敏度差异为 4.5%。

4 实验结果

将选择的磁光晶体 $CdMnTe$ 应用到传感器系统中,采用输出功率为 10 mW, 波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器进行实验。

图5给出了传感器的频率响应的测量结果。图中显示,在频率为 $10^7 \sim 10^8$ Hz 处,由于磁光晶体的

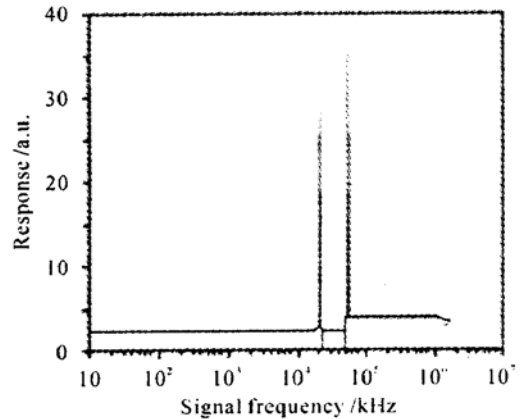


图5 磁场法拉第效应与磁场频率的关系
Fig. 5 Measured magnetic field frequency dependence of the Faraday effect

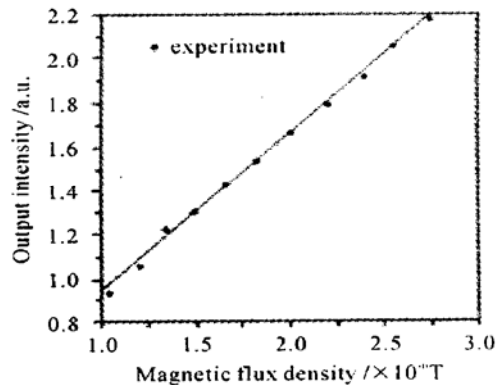


图6 单通道传感器测量的传输特性(10 mm $CdMnTe$)
Fig. 6 Measured transfer characteristic for a single pass magnetooptic sensor (10 mm $CdMnTe$)

压电共振,传感器的频率响应突然增大;而当信号频率高于 2 GHz 时,传感器的频率特性逐渐变差。

图 6 为磁光传感器的传输特性。由图可见,磁光传感器的实际传输特性和理论传输特性存在着一定的误差。采用最小二乘法对实验数据进行线性回归分析,得到曲线的拟合度为 96.4%。

造成误差的原因至少有以下三点:系统中存在激光器噪声和放大器噪声;其次,由于环境温度的变化造成的探测器响应漂移;由于实验场所缺少必要的磁场防护,外界磁场干扰对测量的结果有一定的影响。

实验发现,为保证探测器获得足够的信噪比,半导体激光器输出功率应 ≥ 1 mW,每个探测器的噪声电流应 ≤ 1 μ A。探测器最低噪声应 ≤ 50 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

基于法拉第磁光效应的光纤磁场传感器的测量范围从 0.25 μ T 到 1 mT,动态范围可达 2 GHz。传感器经过校准后,对 2 GHz 内的磁场进行测量,结果和计算机模拟结果是一致的。

5 结 论

为了提高光纤磁场传感器的性能,我们选用了灵敏度高、频率特性好的 CdMnTe 磁光晶体,并采用

保偏光纤作为光信号的传导介质。运用计算机模拟优化设计和评估传感器的性能,实验结果与计算机模拟结果是一致的。这种传感器为强电磁辐射下和复杂结构中的磁场测量提供了一种很好的途径。它的最大优点在于传感器采用全被动的、全绝缘的传感头,可消除传感头本身对被测电磁场的串扰,从而提高了测量精度。

参 考 文 献

- 1 J. Mora, A. Diez, J. L. Cruz *et al.*. A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for DC-current and temperature discrimination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1680~ 1682
- 2 M. N. Deeter, A. H. Rose, G. W. Day. Fast, sensitive magnetic-field sensors based on the Faraday effect in YIG [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(12): 1838~ 1842
- 3 Dai Imaizumi, Tomokatsu Hayakawa, Masayuki Nogami. Faraday rotation effects of Mn²⁺-modified Tb₂O₃-B₂O₃ glass in pulsed magnetic field [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4): 740~ 744
- 4 D. Y. Kim, H. J. Kong, B. Y. Kim. Fiber-optic DC magnetic field sensor with balanced detection technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8): 945~ 948
- 5 P. Coghill, I. M. Bassett, D. Wong. A passive high sensitivity magnetic field sensor based on metallic glass wire [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(8): 1918~ 1925