

光源线宽对内置式光纤法布里-珀罗 磁场传感器灵敏度影响的分析

袁纵横 刘永智 扬亚培

(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

摘 要 分析了内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器的灵敏度及光源线宽对灵敏度的影响。结果表明, 光源线宽愈窄, 灵敏度愈高; 法布里-珀罗腔的反射率在线宽和腔长一定时, 有一最佳值。反射率取最佳值时, 探测的磁场最小, 灵敏度最高。

关键词 法布里-珀罗干涉仪, 光纤传感器, 磁场测量。

1 引 言

弱磁场测量具有广泛的应用前景。自 1980 年 Yariv^[1] 提出利用磁致伸缩光纤磁场传感器以来, 许多国家投入了研究。用于弱磁场测量的干涉仪主要有马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪、迈克耳孙(Michelson)干涉仪和法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪。其中, 马赫-曾德尔干涉仪和迈克耳孙干涉仪是双光束干涉, 由于传感光纤可以很长, 具有很高的灵敏度, 且信号检测容易, 人们研究较多。用马赫-曾德尔干涉仪探测的最低磁场为 5×10^{-9} Oe/m (4×10^{-7} A/m)^[2], 用迈克耳孙干涉仪探测的最低磁场为 0.2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ^[3]。但是, 这两种干涉仪有参考臂和传感臂, 结构不紧凑, 在制作中也难以做到完全一样长, 因此, 易受温度、环境振动的影响。法布里-珀罗干涉仪由于传输函数复杂, 对光源的相干长度要求高而在弱磁场测量中未被重视。随着窄线宽光源的出现, 以及由于光纤法布里-珀罗(FFP)干涉仪具有体积小、结构紧凑、抗振动好的优点, 法布里-珀罗磁场传感器受到了一些学者的重视。Ki Dong Oh 等^[4]研究了低精度的外置式法布里-珀罗磁场传感器, 获得探测的最低磁场为 100 nT, 本文将研究内置式光纤法布里-珀罗磁传感器的灵敏度以及光源线宽的影响。

2 内置式光纤法布里-珀罗(IFFP)磁场传感器的灵敏度

2.1 基本结构

内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器的基本结构如图 1 所示。两端镀有反射膜的光纤构成内置式光纤法布里-珀罗干涉仪, 此段光纤的一部分镀镍或与磁致伸缩材料(如金属玻璃)粘在一起, 就构成了内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器。螺线管用来产生交流调制磁场, 压

电陶瓷(PZT)的作用是稳定工作点, 探测器将光信号变为电信号, 由计算机进行处理。

2.2 灵敏度公式

内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器的灵敏度取决于该干涉仪的工作点的选择。当干涉仪工作在其输出光强 I 随相位 φ 变化的最大处时, 即可获得最大探测灵敏度。设干涉仪工作于 $dI/d\varphi$ 取最大值点 φ_0 , 有一交变磁场加在磁致伸缩材料上, 引起光纤长度变化, 产生相位变化 $\Delta\varphi$, 此时, 透射光强发生变化, 忽略高次项得

$$I(\varphi_0 + \Delta\varphi) = I(\varphi_0) + \left(\frac{dI}{d\varphi}\right)_{\max} \Delta\varphi, \tag{1}$$

式中,

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{L_0}{\lambda} \Delta n + \frac{n}{\lambda} \Delta L_0 - \frac{nL_0}{\lambda^2} \Delta\lambda\right), \tag{2}$$

其中, n 为光纤的折射率, L_0 为法布里-珀罗腔的腔长, λ 为真空中的入射光波长。根据相干旋转模型^[5], 在弱磁场下磁致伸缩材料引起的光纤长度变化为

$$\Delta L = LC_{\text{eff}}H^2, \tag{3}$$

式中, ΔL 为光纤伸长, L 为受磁致伸缩材料影响的光纤长度, C_{eff} 为等效磁致伸缩系数, H 为外加磁场。设 H 由直流磁场 H_{dc} 、待测低频交流磁场 $H_{\Omega} \sin \Omega t$ 和交流调制磁场 $H_{\omega} \sin \omega t$ 三部分组成, 即

$$H = H_{\text{dc}} + H_{\Omega} \sin \Omega t + H_{\omega} \sin \omega t, \tag{4}$$

将(3)式、(4)式代入(2)式, 得

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{dc}} + \varphi_{\Omega} + \varphi_{2\Omega} + \varphi_{\omega} + \varphi_{\omega+\Omega} + \varphi_{\omega-\Omega} + \varphi_{2\omega}, \tag{5}$$

式中各项分别对应 $\Delta\varphi$ 中的直流、频率为 Ω 、 2Ω 、 ω 、 $\omega + \Omega$ 、 $\omega - \Omega$ 、 2ω 的分量。测量直流和低频磁场时, 只需要测量对应 ω 和 $\omega \pm \Omega$ 的相移分量就够了。设入射光为单色光, 略去折射率和波长变化项后相应幅值为

$$\varphi_{\text{dc}} = \left(2 \frac{2\pi n}{\lambda} LC_{\text{eff}} H_{\omega}\right) H_{\text{dc}}, \tag{6}$$

$$\varphi_{\omega \pm \Omega} = \left(\frac{2\pi n}{\lambda} LC_{\text{eff}} H_{\omega}\right) H_{\Omega}. \tag{7}$$

将(5)式代入(1)式, 取频率为 ω 的项有

$$I_{\omega} = \left| \frac{dI}{d\varphi} \right|_{\max} \frac{4\pi n}{\lambda} LC_{\text{eff}} H_{\omega} H_{\text{dc}} \sin \omega t. \tag{8}$$

内置式光纤法布里-珀罗干涉仪的输出光加在光电二极管上, 产生光电流 i_p 为

$$i_p = \frac{e\eta}{h\nu} I_{\omega} = \frac{e\eta}{h\nu} \left(\frac{dI}{d\varphi}\right)_{\max} \Delta\varphi, \tag{9}$$

式中: e 为电子电量, η 为量子效率, h 为普朗克常数, ν 为光频。光电流中频率为 ω 的项的幅值 $i_{p\omega}$ 为

$$i_{p\omega} = \left| \frac{dI}{d\varphi} \right|_{\max} \frac{e\eta}{h\nu} \frac{4\pi n}{\lambda} LC_{\text{eff}} H_{\omega} H_{\text{dc}}, \tag{10}$$

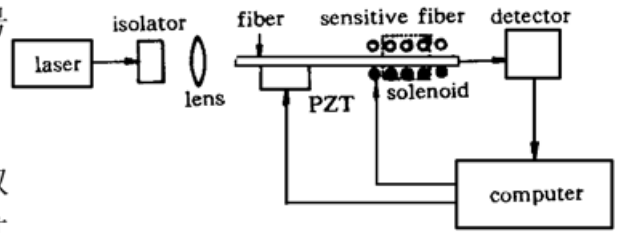


Fig. 1 Intrinsic fiber optic Fabry-Perot magnetic sensor

当噪声主要是散粒噪声时，其信噪比为

$$SNR = \frac{i_p^2}{i_n^2} = \frac{1}{2\Delta f I_0} \frac{\eta}{h\nu} \left(\left| \frac{dI}{d\varphi} \right|_{\max} \frac{4\pi n}{\lambda} LC_{\text{eff}} H_{\text{dc}} \right)^2, \tag{11}$$

式中， Δf 为传感器系统的带宽， I_0 为入射光强。设 $F = 4R/(1-R)^2$ ， R 为法布里-珀罗腔的反射率，通常 $F \gg 1^{[6]}$ ，故有

$$\left| \frac{dI}{d\varphi} \right|_{\max} = 0.64I_0 \sqrt{F}. \tag{12}$$

采用模拟直接探测，在散粒噪声极限下， $SNR=1$ 时，由(11)式、(12)式可求得最小可探测磁场为

$$(H_{\text{dc}})_{\min} = \frac{\lambda}{2.58\pi n \sqrt{FLC_{\text{eff}}H_{\omega}}} \sqrt{\frac{2\Delta fh\nu}{I_0\eta}}. \tag{13}$$

取 $n = 1.5$ ， $\eta = 0.5$ ， $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ， $L = 0.1 \text{ m}$ ， $C_{\text{eff}} = 1.58 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{A}^2$ ， $H_{\omega} = 79.58 \text{ A/m}$ ， $I_0 = 1 \text{ mW}$ ， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ， $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ ， $R = 0.9$ ，得数值结果为

$$(H_{\text{dc}})_{\min} = 7.70 \times 10^{-8} \text{ A/m},$$

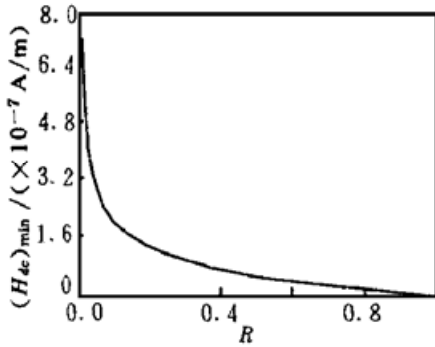


Fig. 2 Relationship of minimum of magnetic field detected vs R

图 2 是由(13)式得出的最低探测磁场与 R 的关系曲线。可见 R 愈大， $(H_{\text{dc}})_{\min}$ 愈低，即探磁灵敏度愈高。利用(7)式，可以得到最小可探测的低频交流磁场为

$$(H_{\Omega})_{\min} = \frac{\lambda}{1.29\pi n \sqrt{FLC_{\text{eff}}H_{\omega}}} \sqrt{\frac{2\Delta fh\nu}{I_0\eta}}, \tag{14}$$

代入上面数据计算得 $(H_{\Omega})_{\min} = 1.54 \times 10^{-7} \text{ A/m}$ ，(13)式和(14)式表明：最小探测磁场与光源、干涉仪参数、探测系统、磁致伸缩系数等有关。

3 光源线宽对探测灵敏度的影响

(13)式、(14)式是在理想单色光情况下得到的，实际的光源均有一定光谱线宽，因此，(13)式、(14)式要进行修正。设入射光的线性函数为 $g(\nu, \nu_0)$ ，谱线半宽度为 $\Delta\nu_g$ ，法布里-珀罗干涉仪的一个周期的频率曲线为 $T(\nu)$ ，半宽度为 $\Delta\nu_2$ ，当在 $T(\nu)$ 周期内，只有一个中心频率的光存在，即入射光为单纵模时，透过法布里-珀罗腔的输出光强为

$$I(\nu, \nu_0) = \int_{-\infty}^{\infty} I_0 g(\nu', \nu_0) T(\nu - \nu') d\nu' = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\nu', \nu_0)(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2[2\pi n L_0(\nu - \nu')/c]} d\nu', \tag{15}$$

光源为洛伦兹线型时，积分结果为

$$I = I_0 \frac{G}{1 + M \sin^2[2\pi n L_0(\nu - \nu_0)/c]}, \tag{16}$$

式中，

$$G = \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \left[\frac{1+R \exp(-2\pi L_0/L_c)}{1-R \exp(-2\pi L_0/L_c)} \right], \quad M = \frac{4R \exp(-2\pi L_0/L_c)}{[1-R \exp(-2\pi L_0/L_c)]^2}, \tag{17}$$

$L_c = c/(2\Delta\nu_g)$ 为入射光的相干长度，由(16)式求出最高相位灵敏度为

$$| \frac{dI}{d\varphi} |_{\max} = 0.628I_0G \sqrt{M}. \tag{18}$$

考虑光源线宽影响后, 在散粒噪声极限下, 由(18)式、(11)式和(6)式、(7)式可得到最低探测直流和交流磁场分别为

$$(H_{dc})_{\min} = \frac{\lambda}{2.58\pi nG \sqrt{MLC_{\text{eff}}H_{\omega}}} \left(\frac{2\Delta f h\nu}{I_0 \eta} \right)^{2/}, \tag{19}$$

$$(H_{\Omega})_{\min} = \frac{\lambda}{1.29\pi nG \sqrt{MLC_{\text{eff}}H_{\omega}}} \left(\frac{2\Delta f h\nu}{I_0 \eta} \right)^{2/}. \tag{20}$$

当光源为理想单色光时, $L_c \rightarrow \infty$, 则有

$$\lim_{L_c \rightarrow \infty} G = 1 \quad \text{和} \quad \lim_{L_c \rightarrow \infty} M = 4R/(1-R)^2,$$

从而(19)式、(20)式分别变为(13)式、(14)式, 与使用理想单色光源时的公式一致。与(13)式、(14)式相比, 因为 $G \sqrt{M}$ 小于 \sqrt{F} , 显然, 考虑光源线宽后, 探磁灵敏度降低了。图3是根据(19)式计算的最低探测磁场与相干长度关系曲线。图4是非理想单色光照射时, 最低探测磁场与反射率 R 的关系曲线。由图3、图4可见, 最低探测磁场 $(H_{dc})_{\min}$ 与反射率 R 及腔长 L_0 和光束相干长度 L_c 有关: 1) 当 $2\pi L_0/L_c$ 的值较小时, 大反射率 R 对应的最低探测磁场 $(H_{dc})_{\min}$ 低, 探磁灵敏度高, 与不考虑线宽的情况相同。2) 当 $2\pi L_0/L_c$ 增大时, $(H_{dc})_{\min}$ 变大, 探测灵敏度下降; 当 $2\pi L_0/L_c$ 较大时, R 大对应的最低探测磁场不一定小, 与不考虑线宽的情况不同。3) R 愈大, $(H_{dc})_{\min}$ 随 $2\pi L_0/L_c$ 的增大愈快。4) 在 $2\pi L_0/L_c$ 一定时, 反射率有一最佳值 R_{opt} , $R = R_{\text{opt}}$ 时, $(H_{dc})_{\min}$ 最小; 并且, R_{opt} 随 $2\pi L_0/L_c$ 的减小而增大, 当 $L_c \rightarrow \infty$ 时, $R_{\text{opt}} \rightarrow 1$ 。出现这些现象的原因可以认为是由于法布里-珀罗腔的输出受反射率 R 和光束相干度大小共同影响的结果, R 增大一方面使法布里-珀罗腔的输出峰变窄, 另一方面又使输出光强下降; 而腔长 L_0 增加将使腔内光束相干度下降, 结果使输出峰加宽。这些作用导致了图3中曲线随 L_0 的变化趋势和图4中最佳值 R_{opt} 的出现。在 R 一定时, L_0 增加使输出峰加宽, 灵敏度下降, $(H_{dc})_{\min}$ 增大。 L_0 愈大, 光束相干度愈小, 输出峰愈宽, $(H_{dc})_{\min}$ 愈大。同时, R 大对应的输出光峰值小, 结果使输出峰尖锐程度受相干度的影响更明显。因此, R 愈大, $(H_{dc})_{\min}$ 随 $2\pi L_0/L_c$ 的增加上升愈快(图3)。在 $2\pi L_0/L_c$ 一定时, 当 R 小时, 随 R 增大, 输出峰变窄起主要作用, 输出峰变尖锐, $(H_{dc})_{\min}$ 就随 R 增大而减小。在 R 达到一定值后, R 增大使透过光

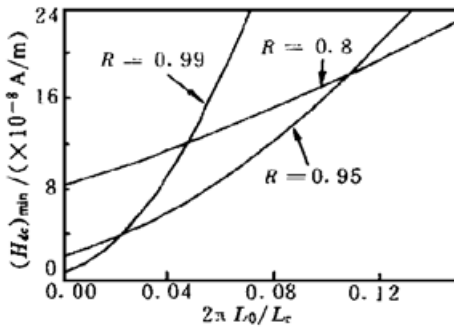


Fig. 3 Relationship of minimum of magnetic field detected vs coherence length

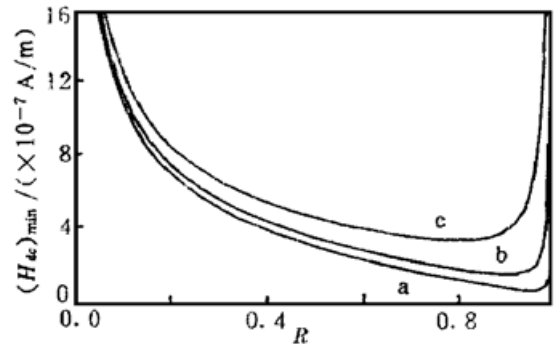


Fig. 4 Relationship of minimum of magnetic field detected vs reflectivity R when $L_c < \infty$. a) $\exp(-2\pi L_0/L_c) = 0.953$, b) $\exp(-2\pi L_0/L_c) = 0.90$, c) $\exp(-2\pi L_0/L_c) = 0.80$

变小导致的输出光强下降引起的输出峰的尖锐度下降更突出,这使得 $(H_{dc})_{\min}$ 随 R 增大而迅速增大。因此,反射率存在最佳值 R_{opt} (图4)。综上所述,在光源一定,相干长度一定的情况下,要获得高的探测灵敏度,就要使法布里-珀罗腔的长度尽量短,并使反射率为最佳值。如采用稳频He-Ne激光器, L_c 约为13 m, L 可取0.1 m,取 $R = R_{\text{opt}} = 0.953$,其余数据和前面一样,得到:

$$(H_{dc})_{\min} = 7.07 \times 10^{-8} \text{ A/m},$$

结 论 在理想单色光照射下,内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器的灵敏度随反射率增大而增大。在有一定线宽的光照射时,光源线宽愈窄,灵敏度愈大;线宽和腔长一定时,反射率有一最佳值。反射率取最佳值时,探测的磁场最小,灵敏度最高。因此,在内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器中,要获得高灵敏度,就要使用窄线宽光源,同时,选择适当的反射率。本文的结果对其它使用内置式光纤法布里-珀罗干涉仪的光纤传感器的制作也具有很大的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Yariv A, Winsor H V. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(3): 87~ 89
- [2] Koo K P, Sigel G H. Characteristics of fiber-optic magnetic-field sensors employing metallic glasses. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(7): 334~ 336
- [3] Bucholtz F, Villarruel C A, Davis A R *et al.*. Multichannel Fiber-Optic magnetometer system for undersea measurements. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1385~ 1395
- [4] Oh K D, Ranade J, Arya V *et al.*. Optical fiber Fabry-Perot interferometric sensor for magnetic field measurement. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(6): 797~ 799
- [5] Livingston J D. Magnetomechanical properties of amorphous metals. *Phys. Stat. Sol. (A)*, 1982, **70**: 591~ 596
- [6] Petuchowski S J, Giallorenzi T G, Sheem S K. A sensitive Fiber-Optic Fabry-Perot interferometer. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(11): 2168~ 2170

Influence of Linewidth on Sensitivity of Intrinsic Fiber-Optic Fabry-Perot Magnetic Sensor

Yuan Zongheng Liu Yongzhi Yang Yapei

(Department of Opto-Electronic Technology,

University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054)

(Received 30 December 1998; revised 29 March 1999)

Abstract The sensitivity of intrinsic fiber-optic Fabry-Perot (F-P) magnetic sensor is studied and the influence of linewidth of light source is discussed. The results show that the linewidth is narrower, the sensitivity will be higher. When the linewidth and the length of F-P cavity are chosen, there is an optimum reflectivity. If reflectivity of F-P cavity equals the optimum, the magnetic field detected is the minimum and sensitivity is the highest.

Key words Fabry-Perot interferometer, optic fiber sensor, magnetic measurement.