

环形激光弱磁传感器原理实验研究

邹大挺 张书练 冯铁荪 田 芊
(清华大学精密仪器系)

提 要

本文首次报道了环形激光弱磁传感器(RLMS)的原理和实验结果,在采用20mm长的铯玻璃作为法拉第元件时,获得了 $2.9 \times 10^{-6} \text{Oe/Hz}$ ($0.0023 \text{Amp/m} \cdot \text{Hz}$)的灵敏度和9hrs内随机漂移 $> 2.3 \text{Hz}$ 的稳定性。

关键词: 磁测量; 磁传感器; 弱磁场测量; 环形激光; 环形激光传感器。

一、前 言

在环形激光腔内加入晶体石英旋光器和磁光法拉第元件就可构成用于弱磁场测量的传感器^[1]——环形激光弱磁传感器。其原理装置如图1所示,其中T是He-Ne 6328 Å 激光增益管, $M_1 \sim M_4$ 是高反射腔镜, Q 是晶体石英旋光器, F 是磁光材料(法拉第元件)H 是被测外磁场在光路方向上的投影分量。根据环形激光理论^[2], 图1所示矩形腔中可以形成四种频率的圆偏振光, 其频率分布如图2所示, ν_q 是腔纵模频率, 左、右旋圆偏振光 ν_L 、 ν_R 的分裂量 ν_{LR} 与 Q 的厚度有关, 当 Q 的厚度为 4.817 mm 时, ν_{LR} 是半个纵模间隔, CW、CCW 分别是 clockwise wave 和 counter-clockwise wave 的缩写。正负旋圆偏振光 ν_+ 、 ν_- 的磁光法拉第分裂量 ν_H 由下式决定:

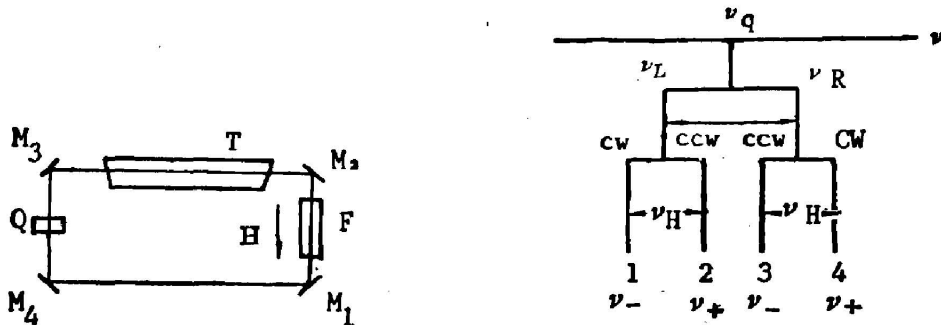


Fig. 1 Schematic drawing of BLMS

Fig. 2 Frequency spectrum of circular polarization modes

$$\nu_H = \frac{c}{\pi \langle L \rangle} V \cdot L \cdot H, \quad (1)$$

式中, L 、 V 分别是磁光材料的长度和维尔德常数, $\langle L \rangle$ 是环腔闭路光程, c 是光速, 由图2可见, 分别取出左、右旋光的法拉第拍频波, 并经电子线路将拍频波倍频后, 两者相加可得双

收稿日期: 1986年11月21日; 收到修改稿日期: 1988年3月23日

倍的法拉第拍频。

$$\nu = k\nu \cdot \frac{2cVl}{\pi \langle L \rangle} \cdot H = k_v \cdot k_g \cdot H, \quad (2)$$

其中 k_v 是倍频因子, k_g 是磁光拍频因子。(2) 式就是 RLMS 的原理公式, 容易看出 RLMS 具有以下两个优点:

1. RLMS 对被测磁场是一个线性响应系统
2. RLMS 的输出频率与光路方向的被测磁场分量成正比, 故 RLMS 又是一种磁场分量测量仪器。

对于一个确定的 RLMS 系统, k_v 、 k_g 是确定的常数, 当计数系统测出环形激光的输出拍频 ν 后, 由下式极易求知被测磁场的大小

$$H = \frac{1}{k_v \cdot k_g} \nu. \quad (3)$$

在 RLMS 中, 灵敏度和稳定性是两项重要的质量指标, 本文着重讨论了 RLMS 的灵敏度与法拉第材料的关系, 报道了灵敏度和稳定性的实验结果。

二、RLMS 的灵敏度对法拉第材料的依赖关系

在弱磁测量中, 希望 RLMS 有较高的测量灵敏度, 由(2)式可知, RLMS 的灵敏度直接取决于 k_v 、 k_g 乘积的大小, 倍频因子 k_v 受信噪比限制, 一般取 $k_v = 10^{20}$, 所以 RLMS 灵敏度实际上取决于磁光拍频因子 k_g , 而 k_g 与腔长和法拉第元件有关, 要获得大的 k_g , 希望腔长 $\langle L \rangle$ 小, 维尔德常数 V 大和 l 长, V 的大小取决于磁光材料的法拉第效应强弱, 腔长 $\langle L \rangle$ 的缩短, 和元件 F 的长度 l 增长则受磁光材料光吸收系数 α 的限制。分析发现 RLMS 的灵敏度基本上是由磁光材料的优值系数 $M = (V/\alpha)$ 决定的。

Table 1 Susceptibility of ZF & Tb glass ($k\nu=1$, $\langle L \rangle=800$ mm, $\alpha l \leq 3\%$)

Material	Application condition	$V \left(\frac{\text{min}}{\text{cm} \cdot \text{Oe}} \right)$	$\alpha (\text{cm}^{-1})$	$l (\text{cm})$	susceptibility $\left(\frac{\times 10^{-6} \text{Oe}}{\text{Hz}} \right)$
ZF ₂	quality, level of existing material	0.055	0.003	10	2.8
ZF ₂ glass	limit value of verdet	0.15	0.003	10	1.0
Tb glass	room temperature, existing material	-0.25	0.013	2	3.0
Tb glass	room temperature the least absorption	-0.25	0.003	10	0.6
Tb glass	75.3 K the least absorption	-1.195	0.003	10	0.13
Tb glass	4 K, the least absorption	-14.27	0.003	10	0.01
Tb glass	2.03 K, the least absorption	-22.43	0.003	10	0.007

note: The V constants of glass in cryogenic condition come from ref. 6

目前,在可见光区具有较高磁光优值系数,又易于获得的材料有重铅玻璃和稀土玻璃,重铅玻璃是抗磁材料,维尔德常数不很大,但它的光吸收很小,可获得较大的优值系数,另外这种材料具有 $\mu_V = \frac{2V}{V2T} = 0$ 的特点,可使 RLMS 具有很好的温度稳定性,稀土玻璃是顺磁材料,突出的优点是 V 值大,但目前国内材料具有较大的光吸收,优值系数与重铅玻璃相当。不过国外文献^[5]报道,可获得光吸收极小的优质稀土玻璃,这样该种材料优值系数的提高是有希望的,稀土玻璃的 V 常数还与温度成反比^[6,7],这是有利有弊的。它既可使 RLMS 在低温状态获得高的灵敏度,也使 RLMS 的热稳定性变坏。表 1 是根据 (2) 式算得的 ZF 玻璃和稀土铯玻璃在几种不同使用条件下,RLMS 可达到的灵敏度。如果对光波的法拉第拍频进行 10 倍(即 $k_s=10$)的频率细分,频率计数精度为 1 Hz,则表 1 中的灵敏度将提高 10 倍,实验中选用了天津硅酸盐研究所研制的铯玻璃作为法拉第磁光元件。

三、RLMS 实验系统

图 3 是 RLMS 实验系统的框图,其中信号提取,处理和显示部分包括合光,分检、光电转换、放大,拍频求和,数据处理及打印,暂时没有加拍频细分电路。图 4 是相应的实验装置示意图。不包括信号处理,显示部分,图中符号意义如下: T_1, T_2 是增益管, F : 法拉第元件, S : 电流线圈, Q : 石英晶体, $M_1 \sim M_4$, 腔反射镜, $M_5 \sim M_8$, 平面反射镜, BS : 分束器, W : $\lambda/4$ 波片, P : 检偏器, D : 探头, 为了克服环形激光器中的拍频闭锁效应^[8],采用高稳定度偏频恒流电源产生法拉第偏频电流磁场,它能输出 $0.1 \mu A \sim 6.0 \mu A$ 连续可调,长时间稳定度 10^{-6} 的电流,加在(图 4 中同轴套在 F 元件上的)罗线圈 S 上,可产生既能调节又能稳定的偏置磁场,线圈长 50 mm,当偏频电流 5 mA 时,在线圈轴线上产生的平均磁场强度约 $10e(79.4 A/m)$ 。拍频求和,数据处理、打印输出是用单板机来完成的。矩形环腔中对称放置两个结构和充气参数完全相同的增益管 T_1 和 T_2 ,主要是为克服 Ne 原子在外磁场作用下所产生的塞曼效应^[9]。 T_1, T_2 的电极布置使阴极在同一边,为的是减小朗缪流零漂。为了获得大的信噪比,这里利用窗片上的剩余反射光作为输出能量。 OW 和 OW 中的左、右旋圆偏振光在 BS 处合并,经过 W 后分别成为相应的线偏振光, P 分别检出左、右旋光信号。 D 作为光电接收器。

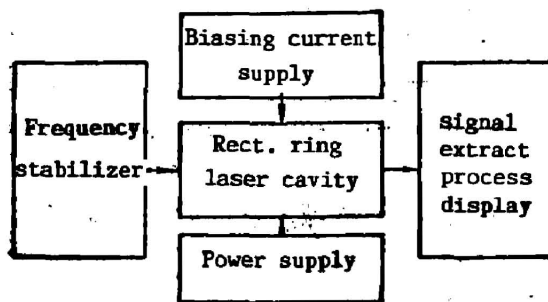


Fig. 3 RLMS experimental system frame

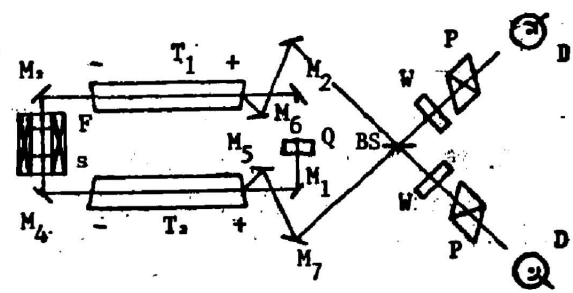


Fig. 4 Experimental setup without including the signal processing

四、RLMS 的灵敏度 and 稳定性实验

1. 灵敏度实验

为从实验中观察现有 RLMS 实验系统的灵敏度, 我们用图 4 所示的环腔对地磁场水平分量作了测量, 在这里矩形环路激光腔的安放位置是使增益管 T_1, T_2 在东西方向上, 这样地磁敏感元件 F (Tb 玻璃) 位于南北方向上, 基本上与地磁水平分量方向一致, 实验中在 Tb 玻璃上产生法拉第拍频的磁场有两个。一个是由线圈 S 产生的恒定偏频磁场 H_s , 另一个是地磁场水平分量 H_e , 这里 H_e 的大小约为 $10e$ (79.58 A/m), 方向由线圈中的电流流向决定。将电流换向一次, 可使 H_s 与 H_e 之间的方向由一致到相反, 或由相反到一致。这样将电流倒向前后的拍频信号相减就可去掉偏频量, 得出地磁法拉第拍频, 实验中我们只取右旋光的拍频信号, 不加倍频细分, 即 $k_v=1$, 则电流倒向前后的两次输出拍频的差值为:

$$\nu = (1 + \text{SFC}_s) \frac{cVl}{\pi \langle L \rangle} \cdot 2H_e$$

由于 $|\text{SFC}_s| \ll 1$, 故在估计灵敏度时可不计及 SFC_s 的影响, 则上式可写成

$$\nu = \frac{cVl}{\pi \langle L \rangle} \cdot 2H_e$$

与(2)式比较, 不难看出当 $k_v=1$ 时, (4)式与(2)式是完全一致的 (H_s, H 只是对被测磁场采用了不同的记号而已), 这就是说由单路拍频 (这里是右旋拍频) 测量可得到双路拍频求和的 RLMS 系统灵敏度, 我们所进行的 7 次重复测量结果如表 2 所示, T_1 和 T_2 的放电电流均为 3 mA , 得到平均拍频量为 $\nu \approx 10211 \text{ Hz}$, 根据国家地震局地物所提供的数据, 我校地磁场水平分量约为 $H_e \approx 0.30e$ (23.873 A/m), 则由(4)式可求出 RLMS 实验系统的灵敏度为, (这里所用 Tb 玻璃长为 20 mm)

$$q \approx 2.9 \times 10^{-5} \text{ Oe/Hz} (0.0023 \text{ A/M} \cdot \text{Hz}) \quad (5)$$

比较(5)式与表 1 第三行所给出的灵敏度值, 可见实验与理论计算符合得很好。

Table 2 Farady beat frequency of the horizontal H_e of earth magnetic field

$I_{HS}(\text{mA})$	1	2	3	4	5	6	7	平均值 mean
+5.0	19291	19287	19287	19286	19287	19290	19296	/
-5.0	9080	9075	9074	9074	9075	9080	9090	/
ν	10211	10212	10213	10212	10212	10210	10206	10211

2. 随机零漂和长期稳定性实验

当系统开机进入平稳后, 我们考察了所用实验系统的随机零漂, 采样时间 10 sec , 对 10 min 内采集数据进行评估, 随机零漂为:

$$\text{单路拍频} \quad 1\sigma \approx 0.77 \text{ Hz}$$

$$\text{双路求和拍频} \quad 1\sigma \approx 1.2 \text{ Hz}$$

这样的零漂稍嫌大, 主要原因是:

- (1) 光路中所用元件质量不太好,
- (2) 由于目前环腔光路是分立元件组成,暴露在大气段的光路,常常受到外界的影响较大。

对 RLMS 进行长期稳定性实验,严格地说应有一个恒定的外磁场,但是,考虑到我们的实验还在初级阶段,所以我们只在以下条件下作了粗略地观察。

(1) 利用地磁场进行测量,根据地物所提供的数据,地磁场 24hrs/day 内的变化一般为 $20 \sim 40 \text{ r}$ ($0.0159 \sim 0.0318 \text{ A/m}$), 晚间变化很小,有一定的稳定性,可认为是恒定磁场。

(2) 实验时间安排在晚上 10 点以后,这样实验室周围基本上无电网干扰,地磁场也开始平稳。

(3) 用单路拍频测量,这时 RLMS 的灵敏度比 (5) 式所示低一倍,即为 5.8 r/Hz ($0.0023 \text{ A/m} \cdot \text{Hz}$), 这样可进一步减少地磁场缓慢变化的影响。

图 5 是晚间长达 9 hrs 内的地磁法拉第拍频记录,两增益放电电流都是 3.0 mA 。采样时间为 1 min , 拍频随机变化 $1\sigma \approx 2.3 \text{ Hz}$, 最大慢漂为 13 Hz , 这个数据中可能已经包含了地磁场的波动。

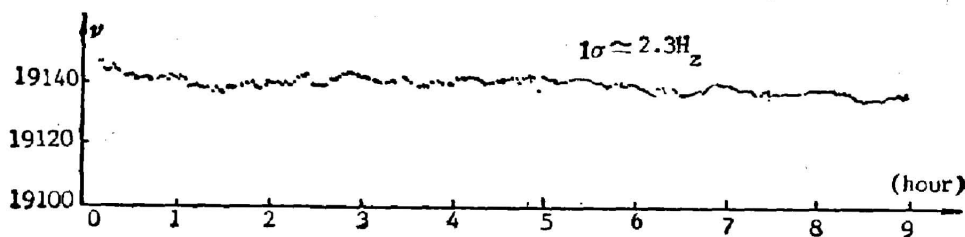


Fig. 5 RLMS stability during 9 hours

五、结 束 语

利用环形激光进行弱磁场测量是一个全新的思想,在这方面的实验研究也是第一次,从初步实验来看,RLMS 的原理是正确可靠的,并且有希望成为灵敏度高,性能稳定的分量式磁力仪,随着研究的深入,也有可能成为很有前途的三座磁力仪。

感谢全国藩教授和中科院地物所史美光高级工程师的指导;感谢周勋、徐毅、沈少熙、聂春生、马霞、范瑞瑛,以及教研室激光组的全体同志对我们的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] 张书练等;《地球物理学报》, 1986, 9, No. 4, 363.
- [2] 姜亚南;《环形激光陀螺》, (清华大学出版社, 1985 年版).
- [3] 张书练等;《光学学报》, 1987, 7, No. 12 (Dec), 112.
- [4] N. F. Borrelli; *J. Chem. Phys.*, 1964, 11, No. 11, 3289.
- [5] C. C. Robinson *et al.*; *Appl. Opt.*, 1964, 3, No. 10, 1190.
- [6] M. Laybell; *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 11, No. 3, 79.
- [7] J. A. Davis *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, 23, No. 4, 633.

The principle of ring laser magnetic sensor for weak field and its experimental investigation

ZOU DATING, ZHANG SHULIAN, FEN TISUN AND TIAN QIAN
(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing)

(Received 21 November 1986; revised 23 March 1988)

Abstract

This paper reports the principle and the experimental results of the ring laser magnetic sensor for weak field (RLMS) for the first time. Theoretical analysis indicates that the RLMS susceptibility mainly depends on the merit coefficient of magneto-optical material. In our experiments a terbium-silicate glass of 20 mm length is used as a Faraday cell, a susceptibility of 2.9×10^{-2} Oe/Hz (0.0023 A/m·Hz) and a random shift of less than 2.3 Hz during 9 hour have been obtained.

Key words: magnetic measurement; magnetic sensor; weak magnetic field measurement; ring laser; ring laser sensor.