

弱磁场下法拉第效应的实验 研究及可能应用讨论

张书练 杨 森 张 钊
(清华大学精密系)

提 要

利用了四频环形激光对磁场的高度敏感性测量了Tb玻璃(磁场范围 0.8×10^{-3} T(Tesla)~ 10^{-3} T), ZF₂玻璃(0.21×10^{-4} T~ 1.89×10^{-4} T)的费尔德常数(Verdet constant)。在本实验精度范围内,得到了该常数大小和强磁场下的值一致。以此实验结果为基础,简要地讨论了用置于环形激光中的法拉第磁光材料感测地磁场的构思和发展前景。

一、引 言

在一块各向同性的弱磁介质上外加磁场时,一束线偏振光沿磁场方向入射到弱磁介质中,出射光的偏振面将发生旋转。旋转角 θ 与沿光束传播方向的磁场强度 H 及样品通光方向的长度 l 成正比

$$\theta = V H l, \quad (1)$$

式中 V 叫费尔德常数(Verdet constant),又叫磁光系数。

已往的 V 值测量是通过测出 θ 角后由(1)式进行推算的。由于一般弱磁材料的磁光系数很小,如ZF₂火石玻璃 $V = 0.5 \times 10^3 / \text{cm} \cdot \text{T}$,只有当所加磁场较大时,光的偏振面才有明显的旋转。因此,人们对于磁光旋转的精确定量实验一般限于强磁场,而对 10^{-3} T(10Oe)以下的较弱磁场下磁光旋转的精确定量研究较少。

二、实验原理及装置

用作研究弱磁场下磁光效应的实验装置如图1所示。实验装置的原型是四频环形激光器。 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 是四面反射镜,分别置于矩形的四个角上,构成矩形激光谐振腔。矩形腔可以在给定的腔长下增加增益管长度提高总增益,以便放入大长度的磁光材料。在矩形腔中,激光束对于每个反射镜的入射角都是 45° 。

A_1 、 A_2 是两只He-Ne激光增益管(其两端为消反射窗片)提供对光的增益。使光绕环路一周所得增益大于所受损耗。 B 是一块石英晶体,长度为4.817mm,使环路内形成圆偏振光振荡而抑制线偏振光的产生。 C 是一根磁光材料,即待测介质。其上套一个电流线圈,用以产生一个弱磁场。线圈由一组电池供电,改变串联电阻 R 的大小可以改变电流值,电流大小由数字万用表监视。

设电流线圈的方向是顺时针的。按环形激光理论，环形激光器内存在四种光频率：右旋、正旋逆时针光(频率1)；右旋、负旋顺时针光(频率2)；左旋、正旋顺时针光(频率3)；左旋、负旋逆时针光(频率4)。两右旋光和两左旋光的频率差均为

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\pm} = \Delta\nu_{\mp} = \frac{1}{\pi} \frac{C}{L_{\mp}} \theta = \frac{1}{\pi} \frac{C}{L_{\mp}} V l H. \quad (2)$$

由(2)式可知，当 H 值给定后，测得 $\Delta\nu_{\mp}$ 或 $\lambda\nu_{\pm}$ 的大小，也即测得了 V 值。

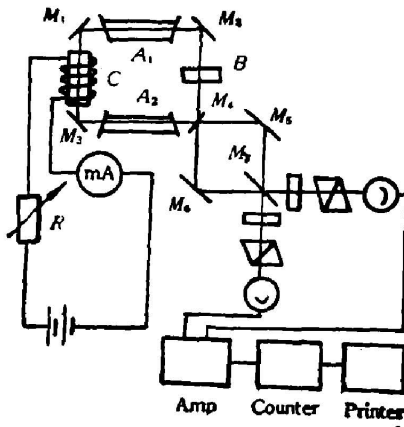


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

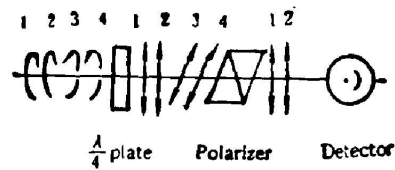


Fig. 2 Principle of merging two laser beams and detecting the beams separately

$$V = \Delta\nu / \left[\frac{1}{\pi} \frac{C}{L_{\mp}} l H \right]. \quad (3)$$

两右旋光和两左旋光分别存在于顺、逆时针光中，顺、逆时针光经反射镜 M_4 出射后分别经 M_5 、 M_6 反射后在 M_7 上汇合。 M_7 为半透半反镜，于是离开 M_7 的光线中就有四种频率的光存在，如图2所示。两个左旋和两个右旋圆偏振光经过 $1/4$ 波片后将变成振动方向正交的两组线偏振光。所以光经过 $1/4$ 波片后 $1, 2$ 的振动方向与 $3, 4$ 的振动方向垂直。转动检偏器，只让一组光通过，即可达到分检的目的。光线 1 和光线 2 (或 3 和 4) 将在行进的路上形成拍频。光拍的频率即是(2)式的频率差 $\Delta\nu$ 。由光电接收器将此光拍变成电信号(正弦波)即可计数。

实验中使用的光电接收器是 PIN 混合光集成探测器，频响宽度为 $0 \sim 1$ MHz。采样、计数、打印系统是由 TP-801 单板机完成的。

三、实验结果及讨论

1. 对 Tb 玻璃的费尔德常数测量

作者对天津硅酸盐所提供的 $V = 0.21' / \text{cm} \cdot \text{Oe}$ ($0.21 \times 10^4' / \text{cm} \cdot \text{T}$) 的 Tb 玻璃进行了实验研究。玻璃长 2 cm 。其上所套线圈长 $L = 4 \text{ cm}$ ， $N = 200 \text{ c/cm}$ ，半径 $R = 1.5 \text{ cm}$ 。环形激光谐振腔长 $L_{\mp} = 90 \text{ cm}$ 。由于线圈内磁场分布是不均匀的，所以必须求出 Tb 玻璃内光路上的磁场强度的平均值，才能准确计算出其 V 值。

线圈磁场沿轴向分布为

$$\left. \begin{aligned} H &= (1/2) NI (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \\ \cos \beta_1 &= \frac{x + (L/2)}{\sqrt{R^2 + [x + (L/2)]^2}}, \\ \cos \beta_2 &= \frac{x - (L/2)}{\sqrt{R^2 + [x - (L/2)]^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

线圈中心轴即为 x 轴, 坐标原点选在线圈中心。

Tb 玻璃感测到的磁场平均值为

$$\bar{H} = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} H dl = \frac{1}{l} \int_0^{l/2} NI \left[\frac{x+(L/2)}{\sqrt{R^2+[x+(L/2)]^2}} - \frac{x-(L/2)}{\sqrt{R^2+[x-(L/2)]^2}} \right] dx. \quad (5)$$

求出定积分并把 $R=1.5\text{cm}$, $l=2\text{cm}$, $L=4\text{cm}$ 代入, 得

$$\bar{H} = 0.77 NI, \quad (6)$$

即实际上的线圈磁场使 Tb 玻璃产生的旋光作用是无限长线圈所起作用的 0.77 倍。

表 1 是所得实验数据(环形激光输出的拍频和线圈上所加电流的关系)。图 3 是用这些数据所做曲线。实际上是一条直线, 其斜率为 6.485kHz/mA (表中数据 $\Delta\nu_{\pm} + \Delta\nu_{\mp} = \frac{2}{\pi} \times \frac{C}{L_{\pi}} V l H$)。

由(6)式代入(3)式, 可得 $V = 0.2 \times 10^4 / \text{cm} \cdot \text{T}$ 和强磁场下的 V 值相同。

Table 1 $\Delta\nu(\text{kHz})$ versus $I(\text{mA})$ of Tb glass

$\Delta\nu$ \ I	-1	0.00	2.00	4.01	6.00	8.01	10.0	19.9	29.6	39.7	50.6
No. 1	2.25	8.92	22.43	35.46	48.38	61.58	74.57	138.64	201.79	267.02	336.96
2	2.25	8.92	22.45	35.47	48.38	61.57	74.57	138.65	201.79	267.02	336.93
3	2.25	8.92	22.44	35.46	48.38	61.57	74.57	138.66	201.80	267.02	337.02
Average	2.25	8.92	22.44	35.46	48.38	61.57	74.57	138.65	201.79	267.02	336.97

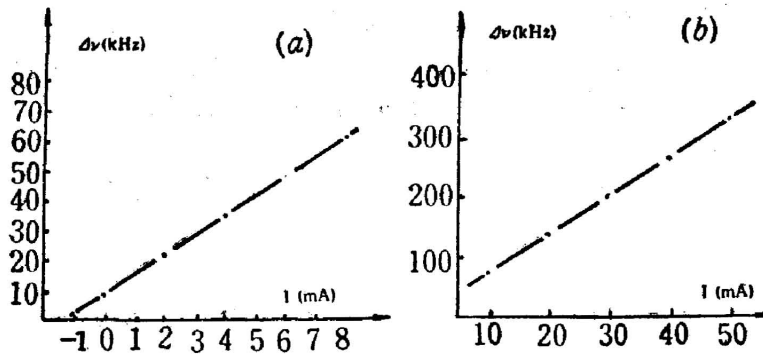


Fig. 3 $\Delta\nu$ versus I of Tb glass

2. 对 ZF_2 玻璃费尔德常数的测量

作者对北京玻璃总厂提供的 ZF_2 火石玻璃进行了实验研究。为了避免地磁场的影响, 玻璃轴线为东西方向; 此方向上的地磁场分量为 10^2nT 左右, 在本实验要求的精度内可以忽略其影响。

环形激光谐振腔长 $L_{\pi} = 96\text{cm}$, 玻璃长 $l = 5\text{cm}$, 线圈长 $L = 7\text{cm}$, 半径 $R = 2\text{cm}$, 匝数 $N = 200$ 匝/cm。由(7)式的定积分可求得火石玻璃内光路上的磁场平均值

$$\bar{H} = 0.82 NI, \quad (7)$$

此式表明: 线圈磁场使材料产生的旋光作用是无限长线圈所起作用的 0.82 倍。

Table 2 $\Delta\nu$ (kHz) versus I (mA) of ZF_2 glass

$\Delta\nu$ \ I	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No. 1	1.44	2.88	4.38	5.80	7.10	8.65	10.12	11.68	12.99
2	1.46	2.93	4.32	5.78	7.28	8.71	10.19	11.68	13.06
3	1.45	2.96	4.31	5.77	7.25	8.68	10.20	11.64	13.50
4	1.43	2.85	4.36	5.84	7.29	8.73	10.17	11.61	13.08
5	1.48	2.89	4.35	5.83	7.30	8.72	10.14	11.61	13.04
Average	1.45	2.90	4.35	5.80	7.25	8.69	10.16	11.64	13.04

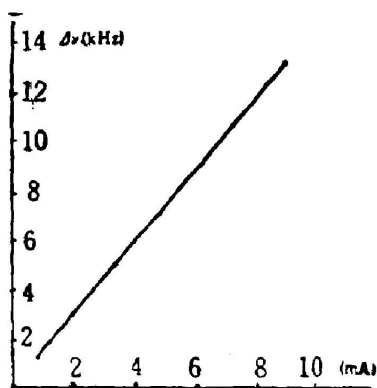
Fig. 4 $\Delta\nu$ versus I of ZF_2 glass

表 2 是环形激光输出的拍频和线圈上所加电流的实验数据。图 4 是用这些数据所作曲线,也是一条直线,即环形激光的输出拍频数和所加磁场成很好的线性。把表 2 中的数据代入(7)式和(3)式即可求出 ZF_2 玻璃的费尔德常数,其大小与强磁场下的费尔德常数相符,均为 $0.5 \times 10^3 / \text{cm} \cdot \text{T}$ 。

由上述实验可得到这样的结论:弱磁介质的法拉第旋转与磁场成线性关系。费尔德常数与强场时相同。

四、地磁场下磁光效应应用的可能性

在地磁场强度范围内存在磁光效应,且弱磁介质的法拉第旋转与磁场成很好的线性关系。这个结论为利用环形激光感测弱磁场,特别是地磁场提供了理论和实验基础*。

由(2)式磁光材料内沿光路的场强分量 H 满足

$$H = \Delta\nu / \left(\frac{1}{\pi} \frac{C}{L_n} \nu l \right). \quad (8)$$

测得环形激光输出 $\Delta\nu$, 即可知道磁场 H 的大小。所以可利用置于环腔中的磁光材料感测地磁场。而地磁场的测量在探矿、军事、地学和天体研究上有着广泛的用途^[2,3]。

为了提高测量灵敏度,同时为了消除某些误差,可将 $\Delta\nu_{\text{正}}$ 和 $\Delta\nu_{\text{反}}$ 同时测出并用计算机

* 地磁场强度分量在 $0 \sim 7 \times 10^4 \text{ rT}$ 。

相加,这时计算机输出

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{左}} + \Delta\nu_{\text{右}}。 \quad (9)$$

这样,环形激光就不再是一个流速、角度或角速度传感器,而只对磁场敏感,成为一个全新原理的分量弱磁传感器。它测得的是环形激光腔内磁光材料内光路上的磁场分量,是一种定轴很好的天然分量仪。

为了对灵敏度有一个定量的了解,下面给出两种材料的测磁灵敏度计算值。取磁光材料长 10 cm, 谐振腔长 70 cm, 拍频细分数(又称为倍频)为 10, 使用 ZF₂ 火石玻璃灵敏度为 0.23 nT, Tb 玻璃为 0.06 nT。

提高环形激光弱磁传感器的灵敏度可以从以下几方面着手:

(1) 选择 V 值大的材料。

(2) 适当选定磁光材料的长度。因为灵敏度与材料长度成正比,要尽量加长其长度。但长度的增加会使吸收也随之增加,材料光吸收达到一定程度时会使激光器不能正常出光。加长增益管长度可提高增益,以便容纳较长的磁光材料,但同时要考虑左、右旋光的频率间隔以及可能出现的多纵模引起的零漂问题。

环形激光陀螺的发展有可能使环形激光的稳定性和拍频探测技术达到 0.05 Hz, 用这样的指标来估计环形激光弱磁传感器的潜在灵敏度,可望达到 10^{-3} nT。

考虑把环形激光弱磁传感器发展成为相对测量(测出不同地点或不同时间地磁场的相对变化值^[3])仪器时,还必须研究其温度系数问题。本文仅指出如下两点:(1)公式(8)中的谐振腔长 $L_{\text{环}}$ 随温度的改变将由稳频技术(也即稳定腔长技术)给予解决,这是已经很成熟的技术。(2)磁光材料的温度系数和长度 l 的热膨胀应根据磁光材料的本身特性而采取措施。火石玻璃被认为是没有温度系数的^[2],而采用 Tb 玻璃时需对这一材料加以温度控制。

由于 $L_{\text{环}}$ 和 l 等参数不是自然常数,环形激光弱磁传感器需进行标定。标定后也能成为绝对测量仪器。

本文得到金国藩教授和冯铁芬副教授的指导及邹大挺、田芊等同志的帮助,在此一并鸣谢。

参 考 文 献

- [1] Francis A. Jenkins; *Fundamental of Optics*, (McGraw-Hill Kogakusha, LTD; Tokyo, 1976), 686.
- [2] Ю. Б. 阿法拉耶夫等著;《磁参数测量器具》, (科学出版社, 1983), 1; 235; 260.
- [3] 广西冶金地质学校;《磁法勘探》, (地质出版社, 1979), 1; 33.

Experimental research of Faraday effect in a weak magnetic field and its possible applications

ZHANG SHULIANG, YONG SEN AND ZHANG ZHAU

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing)

(Received 20 June 1985; revised 2 November 1985)

Abstract

The high sensitivity of a ring laser is used for measuring Verdet constants V of Tb glass and ZF_2 glass in a weak field. The measurement results show that the value of V in a weak field coincides with that in a strong field. Based on the results, possible applications in sensing the earth magnetic field by placing Faraday magneto-optics glass in a ring laser are discussed.