

磁镜偏频石榴石薄膜横向Kerr磁光效应测试方法

蔡焕夫 曾 淳

(国防科技大学, 长沙, 410073)

摘要: 本文介绍了一种灵敏度高 ($\leq 10^{-4}$ 度), 测量迅速的自动消光横向Kerr磁光效应测试仪。该仪器可用于多种表面现象的研究, 并对石榴石薄膜横向Kerr磁光效应进行了测量。

A method of measuring transverse magneto-optical effects in
garnet magnetic mirrors

Cai Huanfu, Zeng Chun

(National University of Defence Technology)

Abstract: An automatic null light instrument for measuring transverse magneto-optic Kerr effects with high sensitivity is introduced in this paper. The instrument can be used in the area of surface analysis, and we have applied it in studying the magnetic garnet films.

一、引 言

应用于横向磁场的Kerr效应, 磁光效应较小。尤其是石榴石材料要用常规仪器测出其反射相移和反射比随磁场的变化比较困难。为了测量的需要, 必须有一种接近实用情况的测量方法, 仪器的灵敏度要达到可以测量出千分之一度的相移。为了解决这一问题, 我们在常规椭偏仪的基础上采用了小抖动调制消光和磁光角度放大方法, 运用扫场控制与微弱信号检测技术, 研制成功了高灵敏横向Kerr磁光效应测试仪。并对各种误差因素进行理论分析和实验设备的完善, 使之达到较高的精度, 该仪器测试分辨率达万分之一度。经过一年多对于横向Kerr磁镜的测试, 表明该仪器测量迅速、重复性好、灵敏度高。同时该仪器还可用于多种表面现象的研究, 在科研中起到了重要的作用。

二、原 理

整个实验装置如图1所示。它在普通椭偏仪的入射和出射光路中增加了两个具有“直流”磁光偏转和“交流”磁光偏转作用的法拉第室 E_{pm} 和 F_{am} ^[1,2]。

对于普通PCSA结构消光椭偏仪, 当 $C = \pm \pi/4$, $\delta_c = -\pi/2$, 光电倍增管的光信号输出为起偏器和检偏器透光轴方位角的函数:

$$I_D = I_0 K_D [\sin^2(A - A_a) + \sin 2A \sin 2A_a \sin^2(P - P_a)]$$

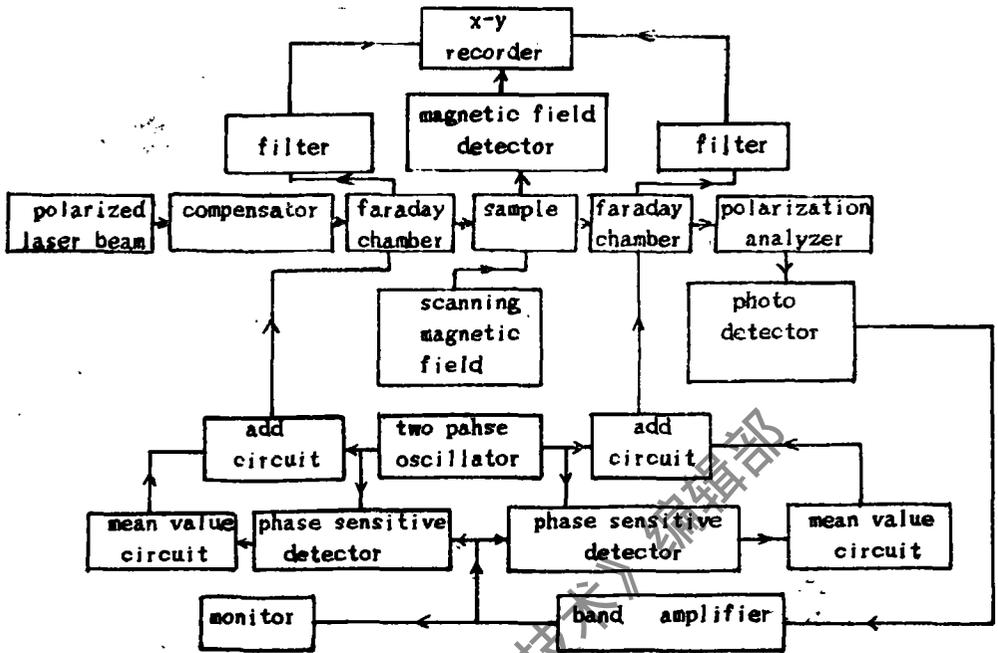


Fig. 1 Schematic diagrams of the instrument

式中， A_s ， P_s 为消光时 A ， P 的角度值， I_0 为全透射状态的入射光通量， K 为光电倍增管的灵敏度。在消光点附近，即 $A \rightarrow A_s$ ， $P \rightarrow P_s$ 时， I 为一个分别由 $\Delta A = A - A_s$ ， $\Delta P = P - P_s$ 决定的近似抛物曲线，抛物线最低点对应消光点。

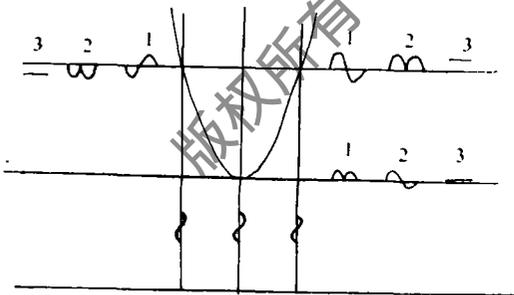


Fig. 2 Principle of vibrating unit to nullify the polarized laser beam
1—output of the band amplifier 2—output of the phase sensitive detector 3—output of the mean value circuit

当在入射和出射光路中加入起偏和检偏法拉第室后，这个抛物曲线由 P ， A 的透光轴方位角和法拉第室 F_{pm} ， F_{am} 的“直流”磁旋光角度共同决定，而法拉第室线圈上加的交流振荡电流引起的交变偏转角度反映到光电倍增管的输出电流中，即为叠加在抛物曲线的小抖动信号。如图2所示。

这个抖动信号的基频项在消光点处为零，在消光点两边相位相反，且振幅与偏离消光点的程度成正比。当我们采取一定的措施检出这个信号，并把这个控制信号反

馈到法拉第室磁场线圈上，就可以达到自动控制消光的目的。读出法拉第室磁场偏转电流，经换算和标定即可读出较小的角度 ΔA ， ΔP 。当在样品上加入扫场磁场时，由于磁场的变化使得磁化强度 M 变化，从而引起磁光旋角的变化，系统自动消光，用 ΔA ， ΔP 的变化去抵消 θ_k 的变化，当我们测量出 ΔA ， ΔP 随 H 的变化关系时，也就等于测得了 θ_k 随 H 的变化关系，这一变化由X-Y记录仪自动记录下来，这就是双臂消光全自动偏偏仪的基本原理。

三、装 置 介 绍

1. 光路部分

实验装置的光源为 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 的He-Ne稳功率激光管,输出功率为毫瓦级。起偏器、检偏器装在可作轴向旋转的光具座上,四分之一波片固定于光具座上。光电接收器为国产GDB_23型,端窗式半透明SbKNaCs光电阴极,十一级SbCs二次发射倍增级。法拉第室的旋光材料为上海光机所研制的CG-75, Ce^{3+} -P 稀土旋光玻璃,有关参数为: $N_D = 1.5673$; 吸收系数 $= 3.7 \times 10^{-3} (\text{cm}^{-1})$, $\lambda = 6328 \text{ \AA}$; Verdet 系数 $= -0.11 (\text{min}/\text{Gs}\cdot\text{cm})$ 。样品置于均匀磁场中,磁场采用亥霍兹姆线圈或封闭式电磁铁。样品架能够作三维精确调整,整个装置固定于钢板上,采取减震措施,以达到一定的稳度要求。

2. 电路部分

(1) 两相位振荡器 两相位振荡器为两路控制电路提供相互之间相位差为 $\pi/2$ 的小振幅抖动和相敏检波电路的参考信号。整个振荡器采用文氏桥振荡器和 $\pi/2$ 相移两部分组成,振荡的中心频率约1.2kHz,后级采用互补射随器以保证电流输出,振荡信号的幅度由反馈网络中的稳压管控制。

(2) 前置放大-选频放大器 这一部分为光电倍增管输出信号的处理电路,它将光电倍增管的输出信号放大,并滤掉直流和二阶以上的谐波分量。前置放大级为电流-电压转换,在光电倍增管和选频放大器之间提供阻抗变换和初步的放大。选频放大器中心频率1.2kHz,带宽20Hz,电压增益10倍。

(3) 相移-相敏-平均-加法-电流放大 这部分的作用是: a. 为法拉第室磁场线圈提供抖动信号。 b. 为选频放大器输出的光信号基频相进行鉴相,取出与各自的参考信号同相或反相的部分,根据相位关系和幅度大小给出控制信号,并作为直流偏转信号送回法拉第室线圈,达到控制消光的目的。

相敏检波电路的电压传输函数为:

$$\begin{cases} U_o = 0 & \text{当 } U_i \text{ 与 } U_{r,e} \text{ 相差为 } 90^\circ \\ U_o = K|U_i| & \text{当 } U_i \text{ 与 } U_{r,e} \text{ 同相} \\ U_o = -K|U_i| & \text{当 } U_i \text{ 与 } U_{r,e} \text{ 反相} \end{cases}$$

其中, K 为电压增益, U_i 为输入电压, $U_{r,e}$ 为参考信号, U_o 为输出信号。

(4) 磁场扫场部分^[3,4] 这部分的作用是: a. 为样品提供偏置磁场。 b. 提供自动测试信号。该部分提供一线性良好、超低频及有一定强度的扫场磁场,经磁场传感头检测与放大后,作为记录仪的扫场测试信号。

(5) 读出部分 采用 π 型阻容滤波器,将与小抖动信号混合的直流分量取出,作为记录仪的Y信号,与扫场信号一起构成该仪器的读出系统。

四、精 度 分 析

小抖动自动消光椭圆偏测量中主要的误差因素为: (1) 各元件的漏光, 补偿元件的不完善, 法拉第室材料的加工误差, 应力双折射; (2) 仪器光路调整的不理想, 各光学元件表面与光轴的不垂直; (3) 自动控制电路和读数系统的不稳定, 电路部分相位调谐不理想; (4)

光电倍增管的散粒噪声等通过电路系统的白噪声对分辨率极限的限制。其中，前三条在原则上是可以通过各种措施加以克服和削弱的，第四条中散粒噪声项和电路中的各种白噪声是不可避免的，它决定了测试的极限精度。我们对此项作一估计。

在消光点附近，普通消光偏仪的光电接收器输出信号为：

$$I_D = I_0 K_L [(\Delta A)^2 + \sin^2 2A_n (\Delta P)^2]$$

式中， ΔA 、 ΔP 为起偏器和检偏器偏离消光点的角度； A_n 为消光时的检偏器方位角。对于小抖动消光，本偏仪可做代换：

$$\begin{aligned} \Delta A &\rightarrow \delta A + A_m \sin \omega t \\ \Delta P &\rightarrow \delta P + P_m \cos \omega t \end{aligned}$$

式中， δA 、 δP 为偏离消光位置的“直流”角度； A_m 、 P_m 为抖动信号的幅度，近似到 δA 、 A_m 、 δP 、 P_m 的二阶项， I 中的直流和基频项为：

$$\begin{aligned} I(0) &= I_0 K_L [(\delta A)^2 + \sin^2 2A_n (\delta P)^2 + 1/2 A_m^2 + 1/2 \sin^2 2A_n P_m^2] \\ I(\omega) &= 2I_0 K_L [\delta A \times A_m \sin \omega t + \delta P \times P_m \times \sin^2 2A_n \cos \omega t] \end{aligned}$$

从上式可以看出，信号基频项中正、余弦分量的振幅与偏离消光点的角度一次方项和振动幅度的乘积成比例，而直流项与 δA 、 δP 的平方项成正比。实际应用中有 A_m 、 $P_m \gg |\delta A|$ 、 $|\delta P|$ 。因此，以基频项为消光的判据比利用直流项作判据灵敏得多。

输出信号随机涨落的原因为：

$$(1) \text{ 散粒噪声 } (\overline{i_{n_e}^2}) = 2ei_{Dk}\Delta f \times G^2, \quad (2) \text{ 负载电阻热噪声 } (\overline{i_{n_t}^2}) = 4kT\Delta f/R_L$$

式中， i_{Dk} 为光电倍增管阴极上的直流电效应， Δf 为后续放大器的带宽， G 为光倍增管增益， k 为玻尔兹曼常数， T 为绝对温度， R_L 为负载电阻。

$$\text{一般情况下有：} \quad (\overline{i_{n_t}^2}) \ll (\overline{i_{n_e}^2})$$

所以在下面的分析中我们也只考虑散粒噪声的影响。

i_{Dk} 中包括背景光电流、暗电流及信号中的直流部分在光倍增管阴极上的直流效应：

$$i_{Dk} = I_D(0)/G + I_0 K_i \gamma + (i_d + i_e)/G$$

式中，第一项为信号的直流项，第二项为系统的漏光， K_i 为光倍增管阴极灵敏度， γ 为漏光系数， i_d 、 i_e 分别为阳极暗电流和阴极背景光电流。 i_e 可以采用暗环境和屏蔽加以消除。

$$\text{取 } A_m = P_m \gg \delta A, \delta P, \sin^2 2A_n = 1;$$

$$\text{有 } i_{k} = I_0 K_i (A_m^2 + \gamma) + i_d / G.$$

$$\text{取 } K_i = 4.55 \mu A / \text{lm}, G = 10^6, i_d = 5 \text{ nA}, \gamma = 10^{-4},$$

$$I_0 = 0.2 \text{ mW} = 0.2 \times 10^{-3} \times 164.4 \text{ lm}, A_m = 1.7 \times 10^{-2};$$

$$\text{则 } i_{k} \approx 5 \times 10^{-11} \text{ A};$$

由信噪比等于1和上面的讨论，可得在散粒噪声限制下能够分辨的最小角度值 δA 、 δP 的表达式，由于 δA 、 δP 是等价的，我们这里只给出 δA 的表达式，对于 δP 这个结果只差一个 $\sin^2 2A_n$ 因子。

$$\delta A = (ei_{k}\Delta f)^{1/2} / \sqrt{2} I_0 K_i A_m,$$

$$\text{取 } \Delta f = 20 \text{ Hz}, \quad \text{则有 } \delta A = 2 \times 10^{-4} \text{ 度}.$$

上式对于我们提高测量精度具有指导性意义。

五、测量实例

我们利用该仪器对于石榴石材料的横向Kerr效应进行了大量的测量,取得了满意的效果。图3、图4所示为石榴石材料的测量曲线,是由X-Y记录仪自动记录的。经过一年多的实际应用表明,该仪器测量精度高,数据重复性好,测量迅速准确,在研究中起到了重要的作用。

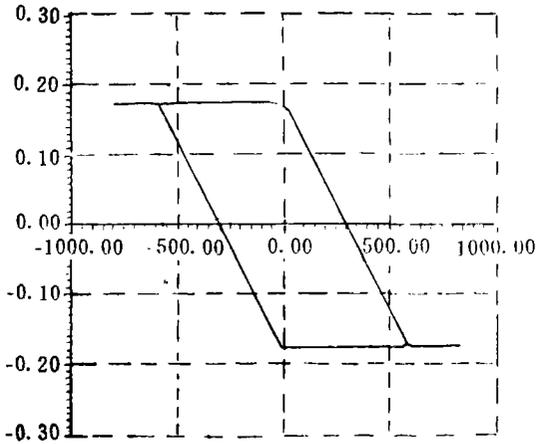


Fig. 3 Change of transverse magneto-optical angle of garnet mirror 1 as a function of applied magnetic field. Rotation angle=0.1725, $H=0.80$ Tesla

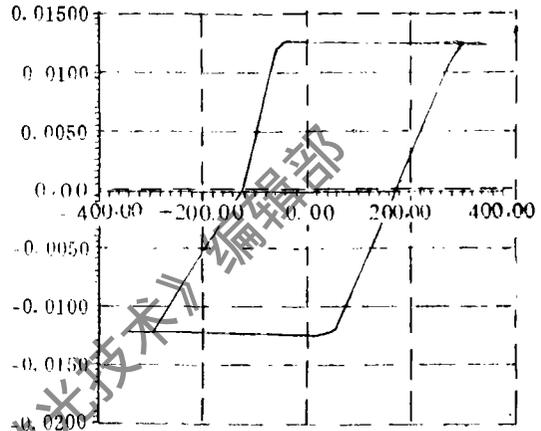


Fig. 4 Typical transverse magneto-optical angle versus applied magnetic field. Kerr angle=0.0123, $H=0.35$ Tesla

高伯龙教授对本仪器的研制提供了指导性的思想,马有年副教授在本仪器的研制中给予了热情的帮助,并进行了很多有益的探讨,龙兴武同志提供了测试样品,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Layer H P. Surface Science, 1969; 16: 177~192
- [2] Mathieu H J, McClure D E, Muller R H. Rev Science Instrum, 1974; 45(6): 798~802
- [3] 尾西康次. 稀土类*铁族合金非晶质垂直磁化膜の关する研究. 日本大阪: 大阪大学工学博士论文, 1983
- [4] Yosuo, Tomita. J O S A, 1984; 11(8): 809

*

*

*

作者简介: 蔡焕夫, 男, 1964年出生。工学硕士, 讲师。现从事微弱信号检测及激光应用技术方面的工作。

曾 淳, 男, 1957年出生。工学硕士, 讲师。现从事环形激光及光电技术方面的工作。

收稿日期: 1992年9月5日。 收到修改稿日期: 1992年12月10日。