

表面磁光克尔效应实验

【实验原理】

磁光效应主要有两种：法拉第效应和克尔效应。1845 年，Michael Faraday 首先发现介质的磁化状态会影响透射光的偏振状态，这就是法拉第效应。1877 年，John Kerr 发现铁磁体对反射光的偏振状态也会产生影响，这就是克尔效应。克尔效应在表面磁学中的应用，即为表面磁光克尔效应（surface magneto-optic Kerr effect）。它是指铁磁性样品（如铁、钴、镍及其合金）的磁化状态对于从其表面反射的光的偏振状态的影响。当入射光为线偏振光时，样品的磁性会引起反射光偏振面的旋转和椭圆率的变化。表面磁光克尔效应作为一种探测薄膜磁性的技术始于 1985 年。

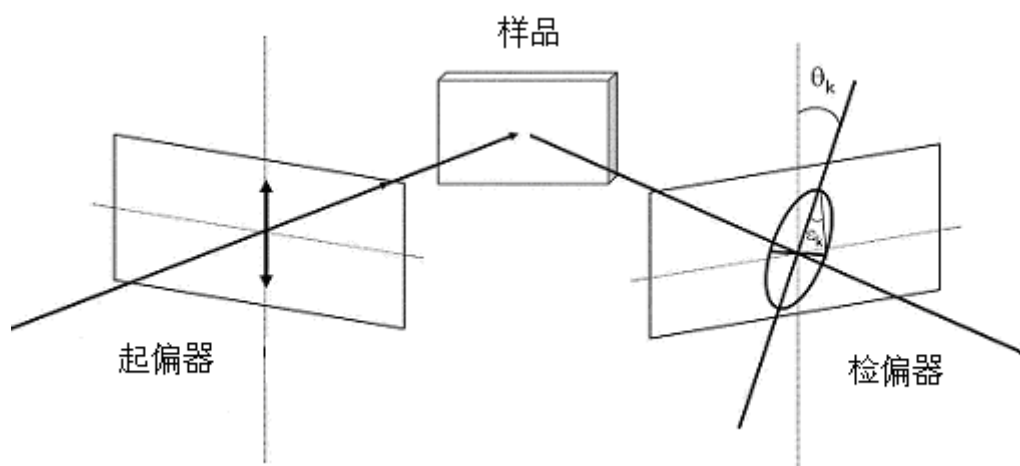


图 1 表面磁光克尔效应原理

如图 1 所示，当一束线偏振光入射到样品表面上时，如果样品是各向异性的，那么反射光的偏振方向会发生偏转。如果此时样品还处于铁磁状态，那么由于铁磁性，还会导致反射光的偏振面相对于入射光的偏振面额外再转过了一个小的角度，这个小角度称为克尔旋转角 θ_k 。同时，一般而言，由于样品对 p 光和 s 光的吸收率是不一样的，即使样品处于非磁状态，反射光的椭圆率也发生变化，而铁磁性会导致椭圆率有一个附加的变化，这个变化称为克尔椭圆率 ϵ_k 。由于克尔旋转角 θ_k 和克尔椭圆率 ϵ_k 都是磁化强度 M 的函数。通过探测 θ_k 或 ϵ_k 的变化可以推测出磁化强度 M 的变化。

按照磁场相对于入射面的配置状态不同，磁光克尔效应可以分为三种：极向克尔效应、纵向克尔效应和横向克尔效应。

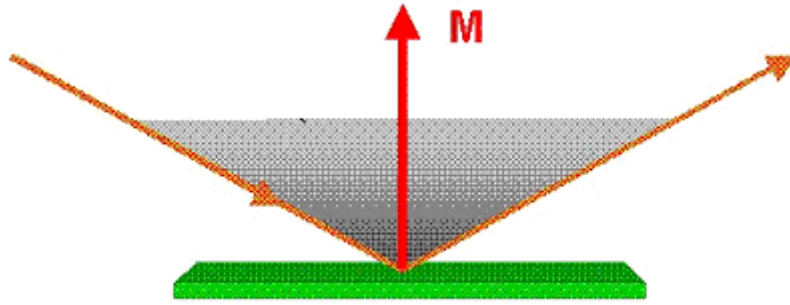


图 2 极向克尔效应

1. 极向克尔效应：如图 2 所示，磁化方向垂至于样品表面并且平行于入射面。通常情况下，极向克尔信号的强度随光的入射角的减小而增大，在 0° 入射角时（垂直入射）达到最大。

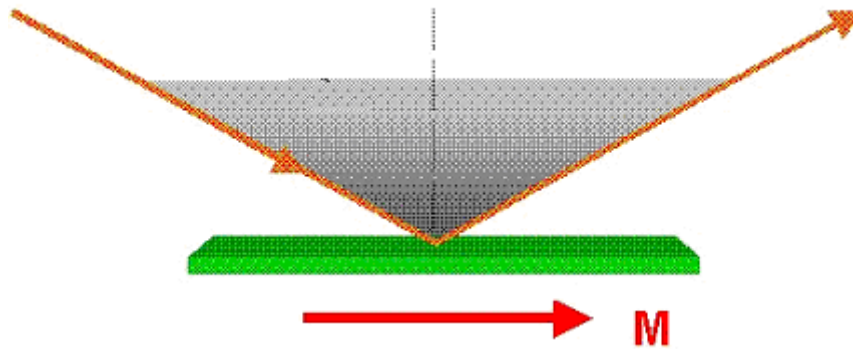


图 3 纵向克尔效应

2. 纵向克尔效应：如图 3 所示，磁化方向在样品膜面内，并且平行于入射面。纵向克尔信号的强度一般随光的入射角的减小而减小，在 0° 入射角时为零。通常情况下，纵向克尔信号中无论是克尔旋转角还是克尔椭圆偏率都要比极向克尔信号小一个数量级。正是这个原因纵向克尔效应的探测远比极向克尔效应来得困难。但对于很多薄膜样品来说，易磁轴往往平行于样品表面，因而只有在纵向克尔效应配置下样品的磁化强度才容易达到饱和。因此，纵向克尔效应对于薄膜样品的磁性研究来说是十分重要的。

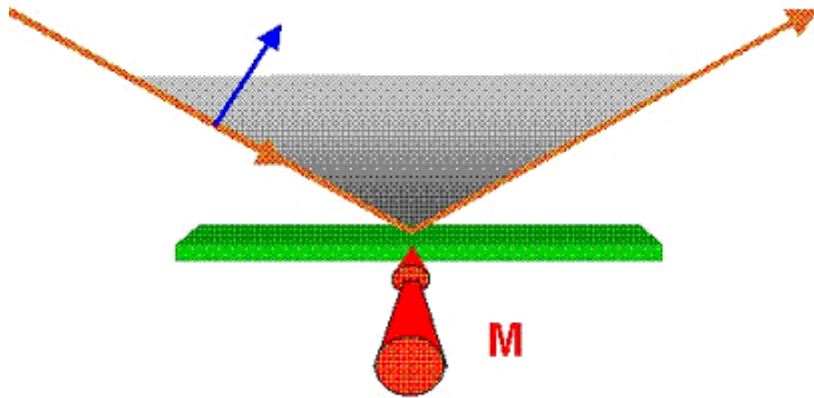


图 4 横向克尔效应

3. 横向克尔效应：如图 4 所示，磁化方向在样品膜面内，并且垂直于入射面。横向克尔效应中反射光的偏振状态没有变化。这是因为在这种配置下光电场与磁化强度矢积的方向永远没有与光传播方向相垂直的分量。横向克尔效应中，只有在 p 偏振光（偏振方向平行于入射面）入射条件下，才有一个很小的反射率的变化。

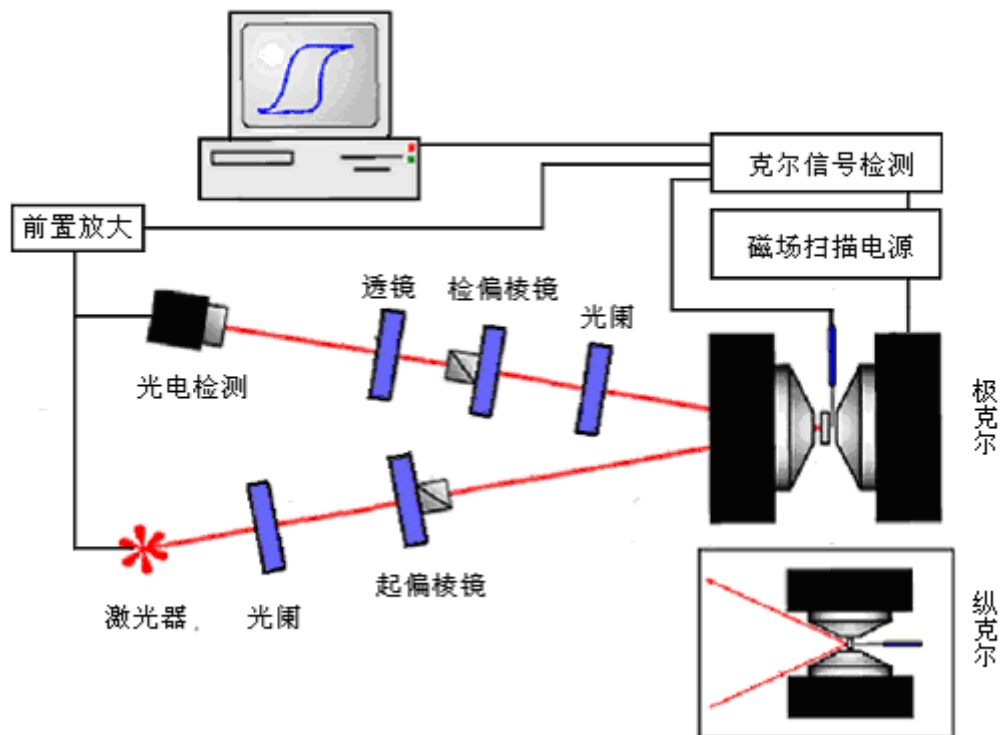


图 5 常见 SMOKE 系统的光路图

以下以极向克尔效应为例详细讨论 SMOKE 系统，原则上完全适用于纵向克尔效应和横向克尔效应。图 5 为常见的 SMOKE 系统光路图，氦-氖激光器发射一激光束通过偏振棱镜 1 后变成线偏振光，然后从样品表面反射，经过偏振棱镜 2 进入探测器。偏振棱镜 2 的偏振方向与偏振棱镜 1 设置成偏离消光位置一个很小的角度 δ ，如图 6 所示。样品放置在磁场中，

当外加磁场改变样品磁化强度时，反射光的偏振状态发生改变。通过偏振棱镜 2 的光强也发生变化。在一阶近似下光强的变化和磁化强度呈线性关系，探测器探测到这个光强的变化就可以推测出样品的磁化状态。

两个偏振棱镜的设置状态主要是为了区分正负克尔旋转角。若两个偏振方向设置在消光位置，无论反射光偏振面是顺时针还是逆时针旋转，反映在光强的变化上都是强度增大。这样无法区分偏振面的正负旋转方向，也就无法判断样品的磁化方向。当两个偏振方向之间有一个小角度 δ 时，通过偏振棱镜 2 的光线有一个本底光强 I_0 。反射光偏振面旋转方向和 δ 同向时光强增大，反向时光强减小，这样样品的磁化方向可以通过光强的变化来区分。

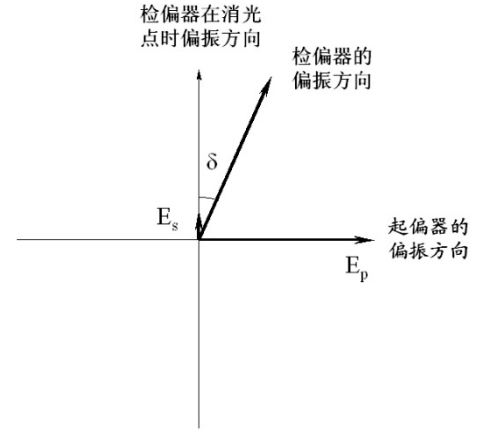


图 6 偏振器件配置

在图 2 的光路中，假设取入射光为 p 偏振（电场矢量 E_p 平行于入射面），当光线从磁化了的样品表面反射时由于克尔效应，反射光中含有一个很小的垂直于 E_p 的电场分量 E_s ，通常 $E_s \ll E_p$ 。在一阶近似下有：

$$\frac{E_s}{E_p} = \theta_k + i \varepsilon_k \quad (1)$$

通过棱镜 2 的光强为：

$$I = |E_p \sin \delta + E_s \cos \delta|^2 \quad (2)$$

将 (1) 式代入 (2) 式得到：

$$I = |E_p|^2 |\sin \delta + (\theta_k + i \varepsilon_k) \cos \delta|^2 \quad (3)$$

因为 δ 很小，所以可以取 $\sin \delta = \delta$ ， $\cos \delta = 1$ ，得到：

$$I = |E_p|^2 |\delta + (\theta_k + i \varepsilon_k)|^2 \quad (4)$$

整理得到：

$$I = |E_p|^2 (\delta^2 + 2\delta\theta_k) \quad (5)$$

无外加磁场下：

$$I_0 = |E_p|^2 \delta^2 \quad (6)$$

所以有：

$$I = I_0(1 + 2\theta_k / \delta) \quad (7)$$

于是在饱和状态下的克尔旋转角 θ_k 为：

$$\Delta\theta_k = \frac{\delta}{4} \frac{I(+M_s) - I(-M_s)}{I_0} = \frac{\delta}{4} \frac{\Delta I}{I_0} \quad (8)$$

$I(+M_s)$ 和 $I(-M_s)$ 分别是正负饱和状态下的光强。从式 (8) 可以看出，光强的变化只与克尔旋转角 θ_k 有关，而与 ε_k 无关。说明在图 5 这种光路中探测到的克尔信号只是克尔旋转角。

在超高真空原位测量中，激光在入射到样品之前，和经样品反射之后都需要经过一个视窗。但是视窗的存在产生了双折射，这样就增加了测量系统的本底，降低了测量灵敏度。为了消除视窗的影响，降低本底和提高探测灵敏度，需要在检偏器之前加一个 1/4 波片。仍然假设入射光为 p 偏振，四分之一波片的主轴平行于入射面，如图 7 所示：

此时在一阶近似下有： $E_s / E_p = -\varepsilon_k + i\theta_k$ 。通过棱镜 2 的光强为：

$$I = |E_p \sin \delta + E_s \cos \delta|^2 = |E_p|^2 |\sin \delta - \varepsilon_k \cos \delta + i\theta_k \cos \delta|^2$$

因为 δ 很小，所以可以取 $\sin \delta = \delta$ ， $\cos \delta = 1$ ，得到：

$$I = |E_p|^2 |\delta - \varepsilon_k + i\theta_k|^2 = |E_p|^2 (\delta^2 - 2\delta\varepsilon_k + \varepsilon_k^2 + \theta_k^2)$$

因为角度 δ 取值较小，并且 $I_0 = |E_p|^2 \delta^2$ ，所以：

$$I \approx |E_p|^2 (\delta^2 - 2\delta\varepsilon_k) = I_0(1 - 2\varepsilon_k / \delta) \quad (9)$$

在饱和情况下 $\Delta\varepsilon_k$ 为：

$$\Delta\varepsilon_k = \frac{\delta}{4} \frac{I(-M_s) - I(+M_s)}{I_0} = -\frac{\delta}{4} \frac{\Delta I}{I_0} \quad (10)$$

此时光强变化对克尔椭圆率敏感而对克尔旋转角不敏感。因此，如果要想在大气中探测磁性薄膜的克尔椭圆率，则也需要在图 5 的光路中检偏棱镜前插入一个四分之一波片。如图 7 所示。

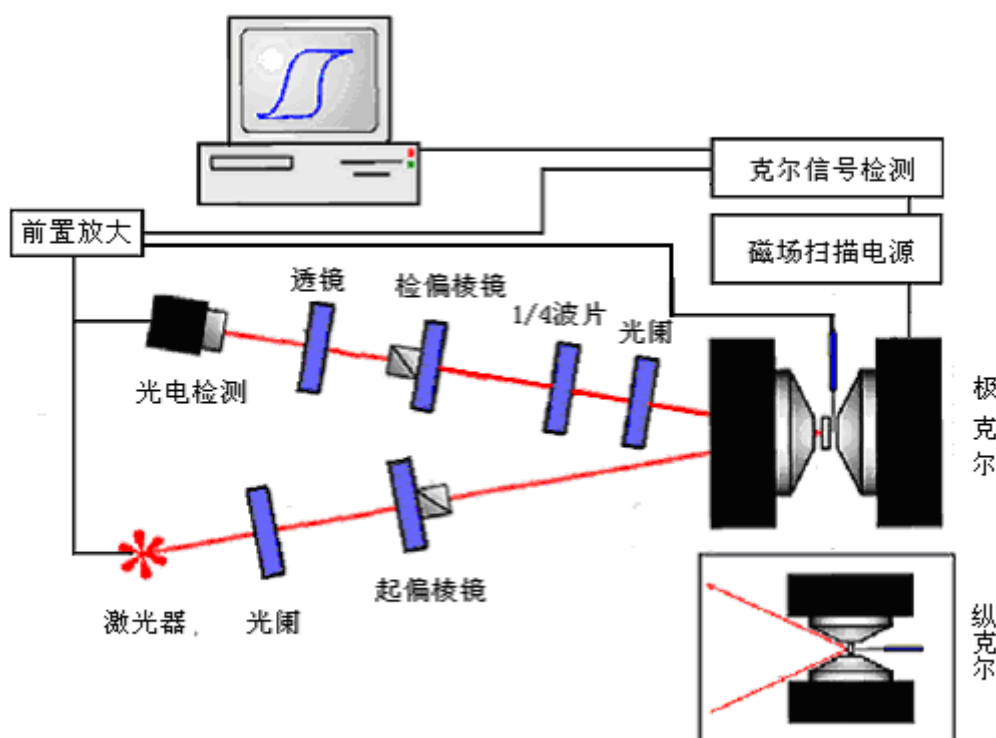


图 7 SMOKE 系统测量椭偏率的光路图

如图 5 所示，整个系统由一台计算机实现自动控制。根据设置的参数，计算机经 D/A 卡控制磁场电源和继电器进行磁场扫描。光强变化的数据由 A/D 卡采集，经运算后作图显示，从屏幕上直接看到磁滞回线的扫描过程，如图 7 所示。

表面磁光克尔效应具有极高的探测灵敏度。目前表面磁光克尔效应的探测灵敏度可以达到 10^{-4} 度的量级。这是一般常规的磁光克尔效应的测量所不能达到的。因此表面磁光克尔效应具有测量单原子层、甚至于亚原子层磁性薄膜的灵敏度，所以表面磁光克尔效应已经被广泛地应用在磁性薄膜的研究中。虽然表面磁光克尔效应的测量结果是克尔旋转角或者克尔椭偏率，并非直接测量磁性样品的磁化强度。但是在一阶近似的情况下，克尔旋转角或者克尔椭偏率均和磁性样品的磁化强度成正比。所以，只需要用振动样品磁强计（VSM）等直接测量磁性样品的磁化强度的仪器对样品进行一次定标，即能获得磁性样品的磁化强度。另外，表面磁光克尔效应实际上测量的是磁性样品的磁滞回线，因此可以获得矫顽力、磁各向异性等方面的信息。

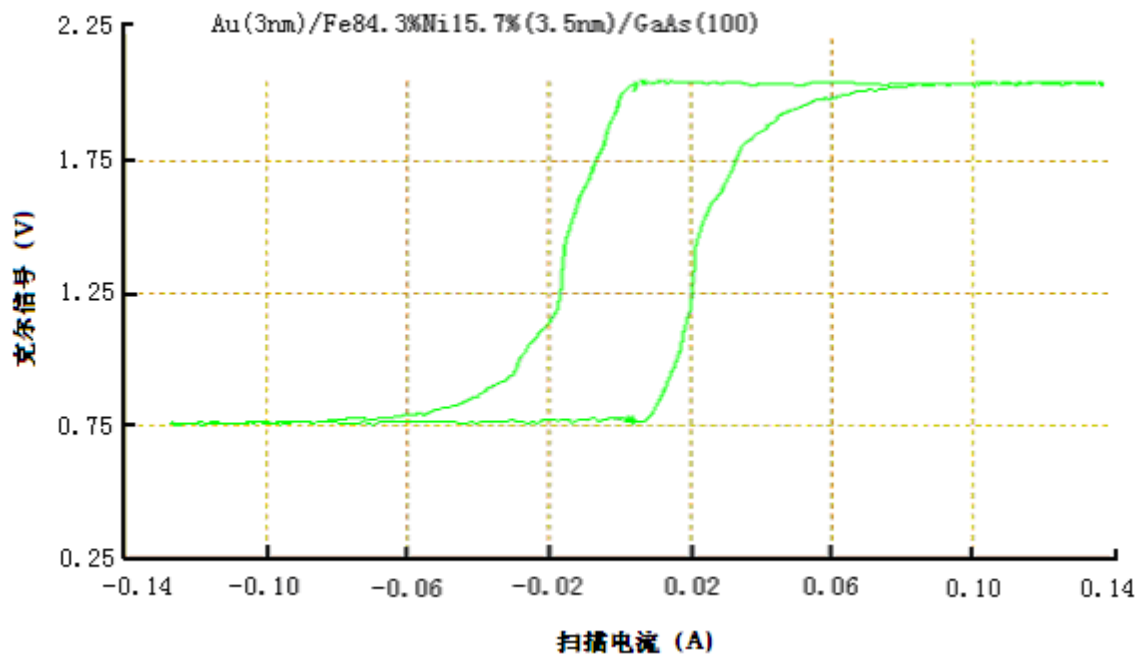


图 8 表面磁光克尔效应实验扫描图样

仪器简介

如图 9 所示,表面磁光克尔效应实验系统主要由电磁铁系统、光路系统、主机控制系统、光学实验平台以及电脑组成。

1) 电磁铁系统

电磁铁系统主要由 CD 型电磁铁、转台、支架、样品固定座组成。其中 CD 型电磁铁由支架支撑竖直放置在转台上,转台可以每隔 90° 转动定位,同时支架中间的样品固定座也可以 90° 定位转动,这样可以在极向克尔效应和纵向克尔效应之间转换测量。

2) 光路系统

光路系统主要由半导体激光器、可调光阑(两个)、格兰—汤普森棱镜(两个)、会聚透镜、光电接收器、四分之一波片组成,所有光学元件均通过底座固定于光学试验平台之上。



图 9

半导体激光器输出波长 650nm,其头部装有调焦透镜,实验时应该调节透镜,使激光光斑打在实验样品上的光点直径最小。

可调光阑采用转盘形式,上面有直径不同 10 个孔。在光电接收器前同样装有可调光阑,这样可以减小杂散光对实验的影响。

格兰—汤普逊棱镜转盘刻度分辨率 1° ,配螺旋测微头,测微头量程 10mm,测微分辨率 0.01mm,转盘将角位移转换为线位移,实验前须对其定标。

会聚透镜为组合透镜。

光电接收器为硅光电池,前面装有可调光阑,后面通过连接线与主机相连。

四分之一波片光轴方向在外壳上标注,外转盘可以 360° 转动,角度测量分辨率 1° 。

3) 主机控制系统

表面磁光克尔效应实验系统控制主机主要由前置放大器部分、克尔信号部分和扫描电源部分组成。

前置放大器部分由光功率计、特斯拉计、光信号和磁信号前置放大器、激光器电源组成。

仪器前面板如图 10 所示:

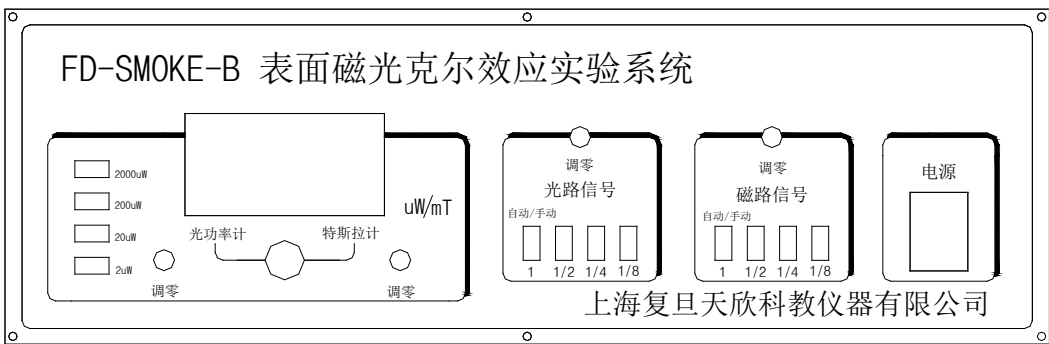


图 10 SMOKE 光功率计前面板示意图

面板中左边方框为光功率计和特斯拉计,切换使用,光功率计分为 $2\mu W$, $20\mu W$, $200\mu W$, $2000\mu W$ 四档切换,表头采用三位半数字电压表。光功率计用来测量激光器输出光功率大小,以及通过布儒斯特定律来确定格兰—汤普逊棱镜的起偏方向。特斯拉计单位为毫特。中间两个增益调节方框通过四档切换分别调节光路信号和磁路信号的放大倍数,当左边标“1”倍放大的琴键开关按下去时为自动档,即通过电脑自动扫描,磁路信号中也相同。

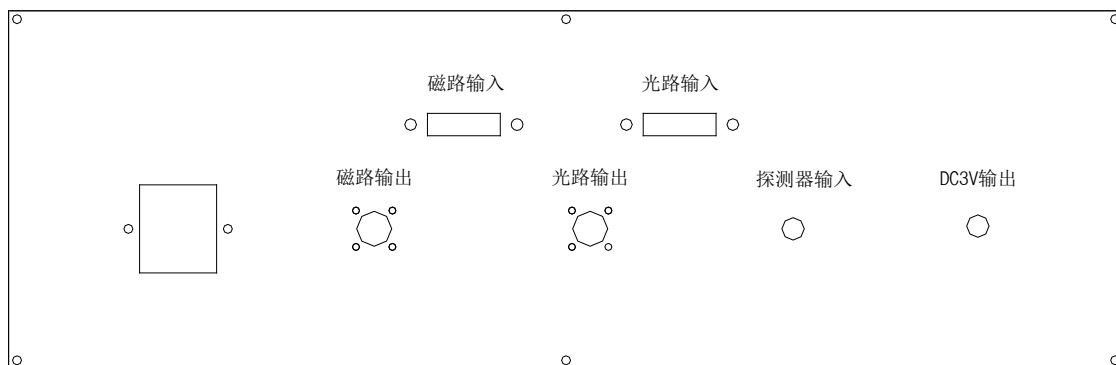


图 11 SMOKE 光功率计后面板示意图

如图 11 所示，为 SMOKE 前置放大器后面板示意图，最左边方框为电源插座，上部“磁路输入”将放置在磁场中的霍尔传感器输出的信号按照对应颜色接入 SMOKE 光功率计控制主机中，同样，“光路输入”将光电接收器中的输出的光信号接入 SMOKE 光功率计控制主机进行前置放大。下部“磁路输出”和“光路输出”分别用五芯航空线接入 SMOKE 克尔信号控制主机后面板中的“磁信号”和“光信号”。探测器输入通过另外一根音频线可以将探测器检测的光信号送入光功率计中显示（注意，这时主要用来检测光信号，属于手动调节，如果需要电脑采集时，必须将探测器信号送入“光路输入”）。“DC3V 输出”用作激光器电源。

克尔信号控制主机主要将经过前置放大的光信号和磁路信号进行放大处理并显示出来，另外内有采集卡通过串行口将扫描信号与计算机进行通讯。

SMOKE 克尔信号控制主机前面板如图 12 所示，

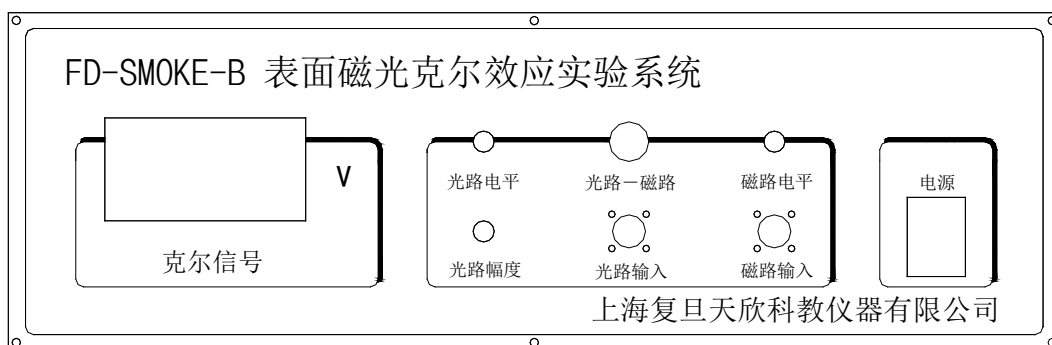


图 12 SMOKE 克尔信号控制主机前面板示意图

图中，左边方框内三位半表显示克尔信号（切换时可以显示磁路信号），单位为“伏特”(V)，实验中应该调节放大增益使初始信号显示约 1.25V 左右（具体原因见调节步骤）。中间方框上面一排，通过中间“光路—磁路”两波段开关可以在左边表中切换显示光路信号和磁路信号，同时对应左右两边“光路电平”和“磁路电平”电位器可以调节初始光路信号和磁路信号的电平大小（实验时要求光路信号和磁路信号都显示在 1.25V 左右）。下排中“光路幅度”电位器为光信号后级放大增益调节。右边“光路输入”和“磁路输入”五芯航空插座与 SMOKE

克尔信号控制主机后面板“光信号”和“磁信号”五芯航空插座具有同样作用，平时只需接入后面板即可。

SMOKE 克尔信号控制主机后面板如图 13 所示，

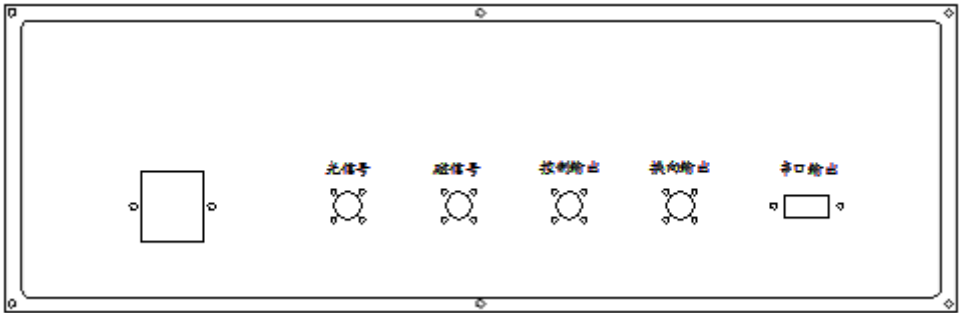


图 13 SMOKE 克尔信号控制主机后面板

左边为 220V 电源插座，“光信号”和“磁信号”五芯航空插座与 SMOKE 光功率计控制主机后面板“光路输出”和“磁路输出”分别用五芯航空线相连。“控制输出”和“换向输出”分别用五芯航空线与 SMOKE 磁铁电源主机后面板“控制输入”和“换向输出”相连。“串口输出”通过九芯串口线与电脑相连。

磁铁电源控制主机主要提供电磁铁的扫描电源。前面板如图 14 所示，

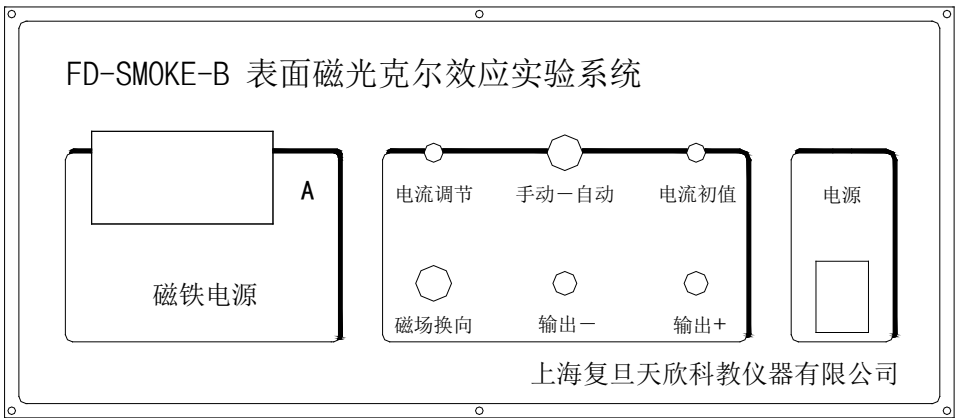


图 14 SMOKE 磁铁电源控制主机

图中左边方框中表头显示磁场扫描电流，单位为“安培”(A)，右边方框内上排“电流调节”电位器可以调节磁铁扫描最大电流，“手动—自动”两波段开关可以左右切换选择手动扫描和电脑自动扫描。“磁场换向”开关选择初始扫描时磁场的方向。“输出+”和“输出—”接线柱与后面板“电流输出”两个红黑接线柱具有同等作用，实验中只接后面板的即可。

如图 15 所示，为 SMOKE 磁铁电源控制主机后面板示意图，

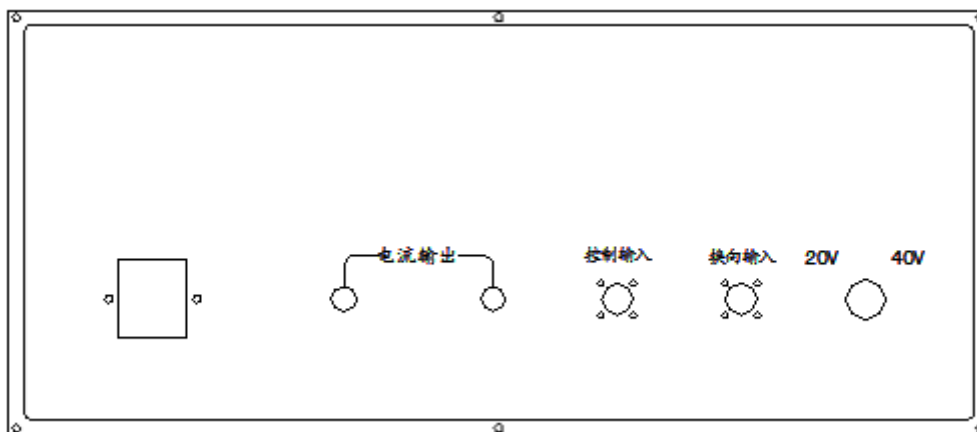


图 15 SMOKE 磁铁电源控制主机后面板示意图

最左边为 220V 交流电源插座，“电流输出”接线柱与电磁铁相连。“控制输入”和“换向输入”通过五芯航空线与 SMOKE 克尔信号控制主机后面板“控制输出”和“换向输出”分别相连。“20V40V”两波段开关为扫描电压上限，拨至“20V”磁铁电源最大扫描电压为“20V”，此时最大扫描电流为“8A”，拨至“40V”磁铁电源最大扫描电压为“40V”，此时最大扫描电流为“12A”。

4) 光学实验平台部分

FD-SMOKE-B 型表面磁光克尔效应实验系统实验平台采用标准实验操作台，台面采用铝合金氧化的光学平板，中间装有减震橡胶。光学元件通过底座与台面可以自由固定。

实验步骤

1. 仪器连接

- 1) 将 SMOKE 光功率计控制主机前面板上激光器“DC3V”输出通过音频线与半导体激光器相连，将光电接收器与 SMOKE 光功率计控制主机后面板的“光路输入”相连，注意连接线一端为三通道音频插头接光电接收器，另外一端为绿、黄、黑三色标志插头与对应颜色的插座相连。将霍尔传感器探头一段固定在电磁铁支撑架上（注意霍尔传感器的方向），另外一端与 SMOKE 光功率计控制主机后面板“磁路输入”相连，注意“磁路输入”也有四种颜色区分不同接线柱，对应接入即可。将“磁路输出”和“光路输出”分别用五芯航空线与 SMOKE 克尔信号控制主机后面板的“磁信号”和“光信号”输入端相连。
- 2) 将 SMOKE 克尔信号控制主机后面板上“控制输出”和“换向输出”分别与 SMOKE 磁铁电源控制主机后面板上“控制输入”和“换向输入”用五芯航空线相连。用九芯串口线将“串口输出”与电脑上串口输入插座相连。
- 3) 将 SMOKE 磁铁电源控制主机后面板上的电流输出与电磁铁相连，“20V40V”波段开关拨至

“20V”（只有在需要大电流情况下才拨至“40V”）。

4) 接通三个控制主机的 220V 电源，开机预热 20 分钟。

2. 样品放置

本仪器可以测量磁性样品，如铁、钴、镍及其合金。实验时将样品做成长条状，即易磁轴与长边方向一致。将实验样品用双面胶固定在样品架上，并把样品架安放在磁铁固定架中心的孔内。这样可以实现样品水平方向的转动，以及实现极克尔效应和纵向克尔效应的转换。在磁铁固定架的一端有一个手柄，当放置好样品时，可以旋紧螺丝。这样可以固定样品架，防止加磁场时，样品位置有轻微的变化，影响克尔信号的检测。

3. 光路调整

1) 在入射光光路中，可以依次放置激光器、可调光阑、起偏棱镜（格兰—汤普森棱镜），调节激光器前端的小镜头，使打在样品上的激光斑越小越好，并调节起偏棱镜使其起偏方向与水平方向一致（仪器起偏棱镜方向出厂前已经校准，参考上面标注角度），这样能使入射线偏振光为 p 光。另外通过旋转可调光阑的转盘，使入射激光斑直径最小。

2) 在反射接收光路中，可以依次放置可调光阑、检偏棱镜、双凸透镜和光电检测装置。因为样品表面平整度的影响，所以反射光光束发散角已经远远大于入射光束，调节小孔光阑，使反射光能够顺利进入检偏棱镜。在检偏棱镜后，放置一个长焦距双凸透镜，该透镜作用是使检偏棱镜出来的光汇聚，以利于后面光电转换装置测量到较强的信号。光电转换装置前部是一个可调光阑，光阑后装有一个波长为 650nm 的干涉滤色片。这样可以减小外界杂散光的影响，从而提高检测灵敏度。滤色片后有硅光电池，将光信号转换成电信号并通过屏蔽线送入控制主机中。

3) 起偏棱镜和检偏棱镜同为格兰—汤普森棱镜，机械调节结构也相同。它由角度粗调结构和螺旋测角结构组成，并且两种结构合理结合，通过转动外转盘，可以粗调棱镜偏振方向，分辨率为 1° ，并且外转盘可以 360° 转动。当需要微调时，可以转动转盘侧面的螺旋测微头，这时整个转盘带动棱镜转动，实现由测微头的线位移转变为棱镜转动的角位移。因为测微头精度为 0.01mm，这样通过外转盘的定标，就可以实现角度的精密测量。通过检测，这种角度测量精度可以达到 1.9 分左右，因为每个转盘有加工误差，所以具体转动测量精度须通过定标测量得到。

4) 实验时，通过调节起偏棱镜使入射光为 p 光，即偏振面平行于入射面。接着设置检偏棱镜，首先粗调转盘，使反射光与入射光正交，这时光电检测信号最小（在信号检测主机上电压表可以读出），然后转动螺旋测微头，设置检偏棱镜偏离消光位置 $1^\circ - 2^\circ$ （具体解释见

原理部分)。然后调节信号 SMOKE 光功率计控制主机上的光路增益调节电位器和 SMOKE 克尔信号控制主机上“光路电平”以及“光路幅度”电位器,使输出信号幅度在 1.25V 左右。

5) 调节信号 SMOKE 光功率计控制主机上的磁路增益调节电位器和 SMOKE 克尔信号控制主机上“磁路电平”电位器,使磁路信号大小为 1.25V 左右。这样做是因为采集卡的采集信号范围是 0—2.5V,光路信号和磁路信号都调节在 1.25V 左右,软件显示正好处于介面中间。

3. 实验操作

1) 将 SMOKE 励磁电源控制主机上的“手动—自动”转换开关指向手动档,调节“电流调节”电位器,选择合适的最大扫描电流。因为每种样品的矫顽力不同,所以最大扫描电流也不同,实验时可以首先大致选择,观察扫描波形,然后再细调。通过观察励磁电源主机上的电流指示,选择好合适的最大扫描电流,然后将转换开关调至“自动”档。

2) 打开“表面磁光克尔效应实验软件”,在保证通讯正常的情况下,设置好“扫描周期”和“扫描次数”,进行磁滞回线的自动扫描。也可以将励磁电源主机上的“手动—自动”转换开关指向手动档,进行手动测量,然后描点作图。

3) 如果需要检测克尔椭偏率时,按照图 7 的光路图,在检偏棱镜前放置四分之一波片,并调节四分之一波片的主轴平行于入射面,调整好光路后进行自动扫描或者手动测量,这样就可以检测克尔椭偏率随磁场变化的曲线。

【参考文献】

1. 朱伟荣,董国胜,一种测量薄膜磁性的表面磁光克尔效应装置,真空科学与技术,1997,4(17),243-246。
2. 谭立国,胡用时,磁光薄膜克尔回转角的测试方法研究,华中工学院学报,1987,15-25。
3. Z. Q. Qiu, S. D. Bader, Surface magneto-optic kerr effect, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 200, 664-678。
4. 刘公强,刘湘林,磁光调制和法拉第旋转测量,光学学报,1984,4(7): 588-592。
5. A. V. Sokolov, Optical Properties of Metals, Elsevier, New York, (1967), Part II。
6. 钱栋梁,陈良尧,一种完整测量磁光克尔效应和法拉第效应的方法,光学学报,1999,4, 233-238。

【附录一】

克尔效应的仪器调节方法补充说明

1. 按说明书中仪器连接的方法将仪器连接好，并能正常联机；
2. 先把检偏棱镜调在消光位置，再偏转测微头一个小角度（ 1° - 2° ）。这时，克尔信号显示为某个电压值（消光时为-1.15V 左右），然后调节前置放大器的“光路增益”到 1.25V 左右（尽量增大光路增益和光路幅度，同时可配合调节“光路电平”旋钮达到 1.25V）。正常时“光路电压”应为稳定在 $1.25V \pm 0.03V$ 范围内。否则，检查并重调光路和光路的接线；
3. 将励磁电源控制主机上的“手动—自动”转换开关指向“手动”档。调节“电流调节”，选择合适的最大扫描电流（当调到某个电流值时，克尔信号电压会有变化），一般在 0.75V 左右。否则按上述步骤重新调整，直至达到这个变化范围；
4. 选择合适的最大扫描电流，将转换开关调至“自动”档。调节信号 SMOKE 光功率计控制主机上的“磁路增益”和 SMOKE 克尔信号控制主机上“磁路电平”，使磁路信号大小为 1.25V 左右，此时磁路信号应稳定（ $\pm 0.03V$ ）；
5. 打开电脑软件进行采集，此时磁路信号应在 0-2.5V 内，否则应电流减小，增减范围视实际情况而定。软件设置方法，将“扫描周期”时间设置为 20MS，“扫描次数”次数设为 2 次。采集图形的 2 次重复性要好，采集过程中光路信号不能有跳变。若采集图形不符合要求，重复步骤 2-4。
6. 检测克尔椭偏率时，按图 7，在检偏棱镜前放置四分之一波片，并调节四分之一波片的主轴平行于入射面，调整好光路后进行自动扫描，这样就可以检测克尔椭偏率随磁场变化的曲线。

注：样品表面的平整及光洁度也会影响实验信号。无法采集正常的信号时，应更换样品。