

表面磁光克尔效应实验

复旦大学物理学系

董国胜、金晓峰、陆申龙、马世红

2011.7.11 于南宁，广西大学

Outline

1. 历史背景
2. 实验原理
3. 实验仪器装置简介
4. 实验测量结果
5. 表面磁光克尔效应在超薄膜磁性之应用
6. 结束语

1. 历史背景

——1845年

Michael Faraday首先发现了**磁光效应**，他发现当外加磁场加在玻璃样品上时，透射光的偏振面将发生旋转，随后他加磁场于金属表面上做**光反射**的实验，但由于金属表面并不够平整，因而实验结果不能使人信服。

1. 历史背景

——1877年

John Kerr在观察偏振光从抛光过的电磁铁磁极反射出来时，发现了磁光克尔效应 (magneto-optic Kerr effect)。

1. 历史背景

—— 1985年

Moog和**Bader**两位学者进行铁磁超薄膜的磁光克尔效应测量，成功地得到一原子层厚度磁性物质的磁滞回线，并且提出了以**SMOKE**来作为表面磁光克尔效应 (**surface magneto-optic Kerr effect**)的缩写，用以表示应用磁光克尔效应在表面磁学上的研究。

1. 历史背景

由于此方法的磁性测量灵敏度可以达到一个原子层厚度，并且仪器可以配置于超高真空系统上面工作，所以成为表面磁学的重要研究方法。

表面磁性以及由数个原子层所构成的超薄膜和多层膜磁性，是当今凝聚态物理领域中的一个极其重要的研究热点。而表面磁光克尔效应（SMOKE）谱作为一种非常重要的超薄膜磁性的原位测量的实验手段，正受到越来越多的重视。并且已经被广泛用于磁有序、磁各向异性以及层间耦合等问题的研究。

1. 历史背景

与其他的磁性测量手段相比较，**SMOKE**所具有的**四个优点**：

1. **SMOKE**的测量灵敏度极高。国际上现在通用的**SMOKE**测量装置其探测灵敏度可以达到亚单原子层的磁性。这一点使得**SMOKE**在磁性超薄膜的研究中有着重要的地位。

2. **SMOKE**测量是一种无损伤测量。由于探测用的“探针”是激光束，因此不会对样品造成任何破坏，对于需要做多种测量的实验样品来说，这一点非常有利。

1. 历史背景

3. SMOKE测量到的信息来源于介质上的光斑照射的区域。由于激光光束的束斑可用聚焦到1mm以下，这意味着SMOKE可以进行局域磁性的测量。这一点是其他磁性测量手段诸如振动样品磁强计和铁磁共振所无法比拟的。

在磁性超薄膜的研究中，样品的制备是一个周期较长而代价昂贵的过程。有人已经实现在同一块样品上按生长时间不同而制备出厚度不等的楔形磁性薄膜。这样从一块样品上就能够得到磁学性质随薄膜厚度变化的信息，可以大大提高实验效率。无疑，SMOKE的这种局域测量的特点使它成为研究这类不均匀样品的最好工具。

1. 历史背景

4. 相对于其他的磁性测量手段，**SMOKE**系统的结构比较简单，易于和别的实验设备（特别是超高真空系统）相互兼容。

这一点有助于提高它的功能并扩展其研究领域。我们试制的表面磁光克尔效应实验系统可以和超高真空系统相连，所以既可以完成磁性薄膜在大气中的**SMOKE**测量，也可以完成在超高真空中的**SMOKE**测量实验。

1. 历史背景

由于**SMOKE**能够达到单原子层磁性检测的灵敏度，即相当于能够测量到小于千分之一度的克尔旋转角。因此，对于**光源**和**检测手段**提出了很高的要求。目前国际上比较常见的是用功率输出很稳定的偏振激光器。

Bader等人采用的高稳定度偏振激光器，其稳定度小于0.1%。也有用**Wollaston**棱镜分光的方法，降低对激光功率稳定度的要求。

Chappert等人的方案是将从样品出射的光经过**Wollaston**棱镜分为s和p偏振光，再通过测量它们的比值来消除光强不稳定所造成的影响。但是这种方法的背景信号非常大，对探测器以及后级放大器的要求很高。

1. 历史背景

由复旦大学表面物理国家重点实验室研制的**SMOKE**系统，可以达到国际上普遍使用的方案所能达到的检测灵敏度。另外，该系统可以配置于超高真空系统中，所以不仅可以完成大气表面磁光克尔效应实验，也可以完成超高真空中的超薄膜磁性测量。

经过改进和工艺化，表面磁光克尔效应实验系统由上海复旦天欣科教仪器有限公司生产。该系统操作方便、实验数据稳定可靠，是科研单位和高校近代物理实验室进行磁性薄膜特性检测、磁学特性研究的优质仪器。



2. 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。

2. 实验原理

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**，简称**SMOKE**）。

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。

2. 实验原理

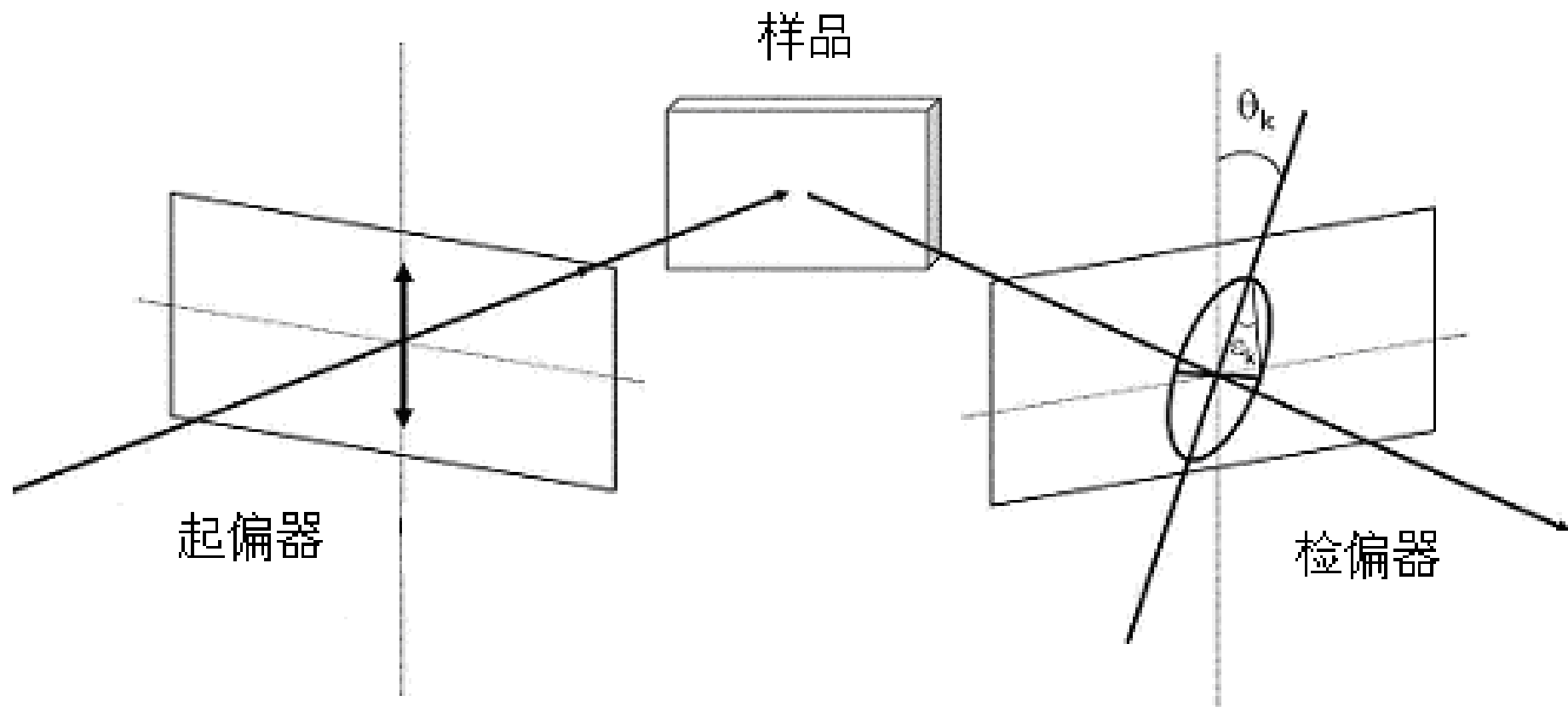


图1 表面磁光克尔效应原理

θ_k 2. 实验原理

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 (*Kerr rotation angle* 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，反射光的椭偏率也发生变化，而铁磁性会导致椭偏率有一个附加的变化，这个变化称为克尔椭偏率 (*Kerr ellipticity* ε_k)。

由于克尔旋转角 θ_k 和克尔椭偏率 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。

2. 实验原理

按照磁场相对于入射面的配置状态不同，可将磁光克尔效应分为三种类型：

- a. 极向克尔效应；
- b. 纵向克尔效应；
- c. 横向克尔效应。

2. 实验原理——极向克尔效应

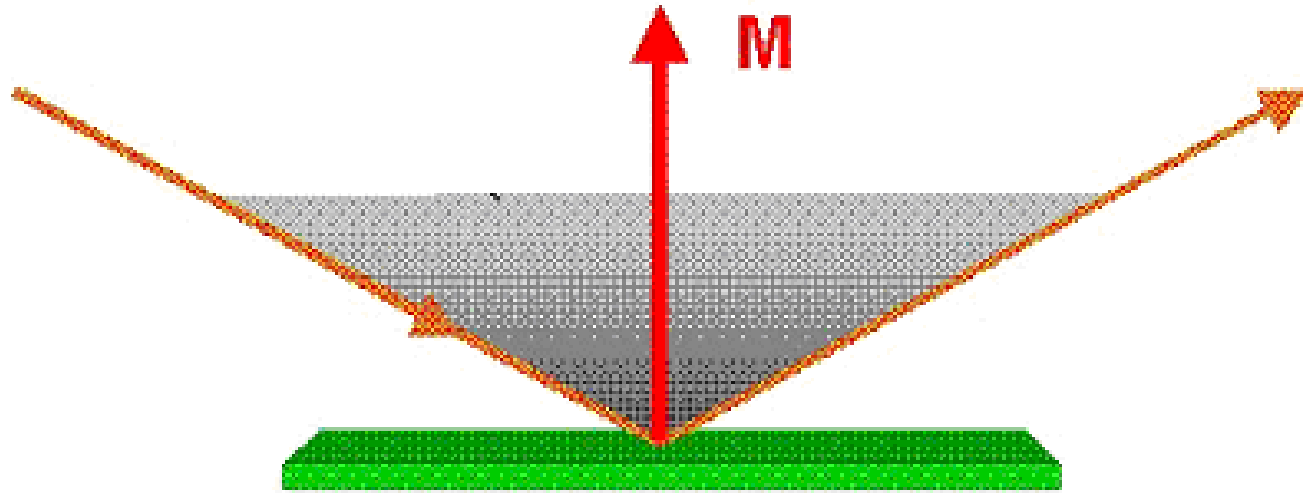


图2 极向克尔效应

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，在入射角时（垂直入射）达到最大。

2. 实验原理——纵向克尔效应

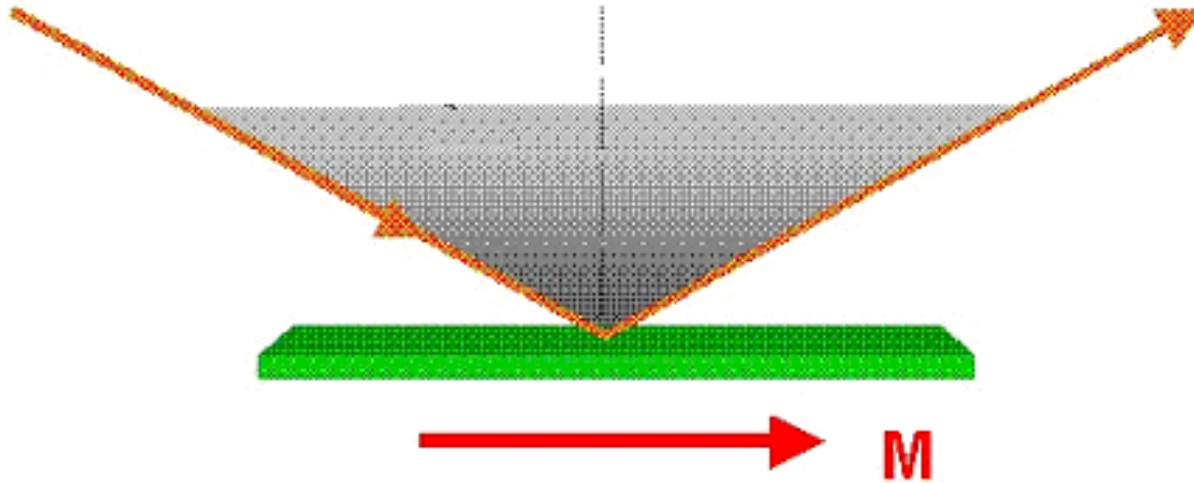


图3 纵向克尔效应

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。

2. 实验原理——横向克尔效应

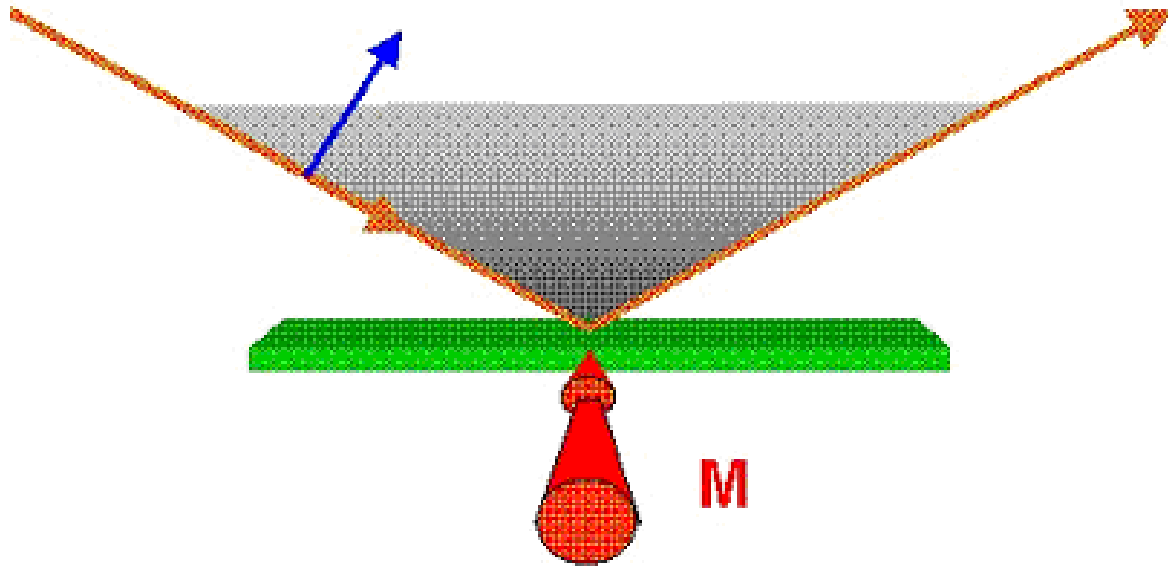


图4 横向克尔效应

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。

2. 实验原理——SMOKE系统的光路图

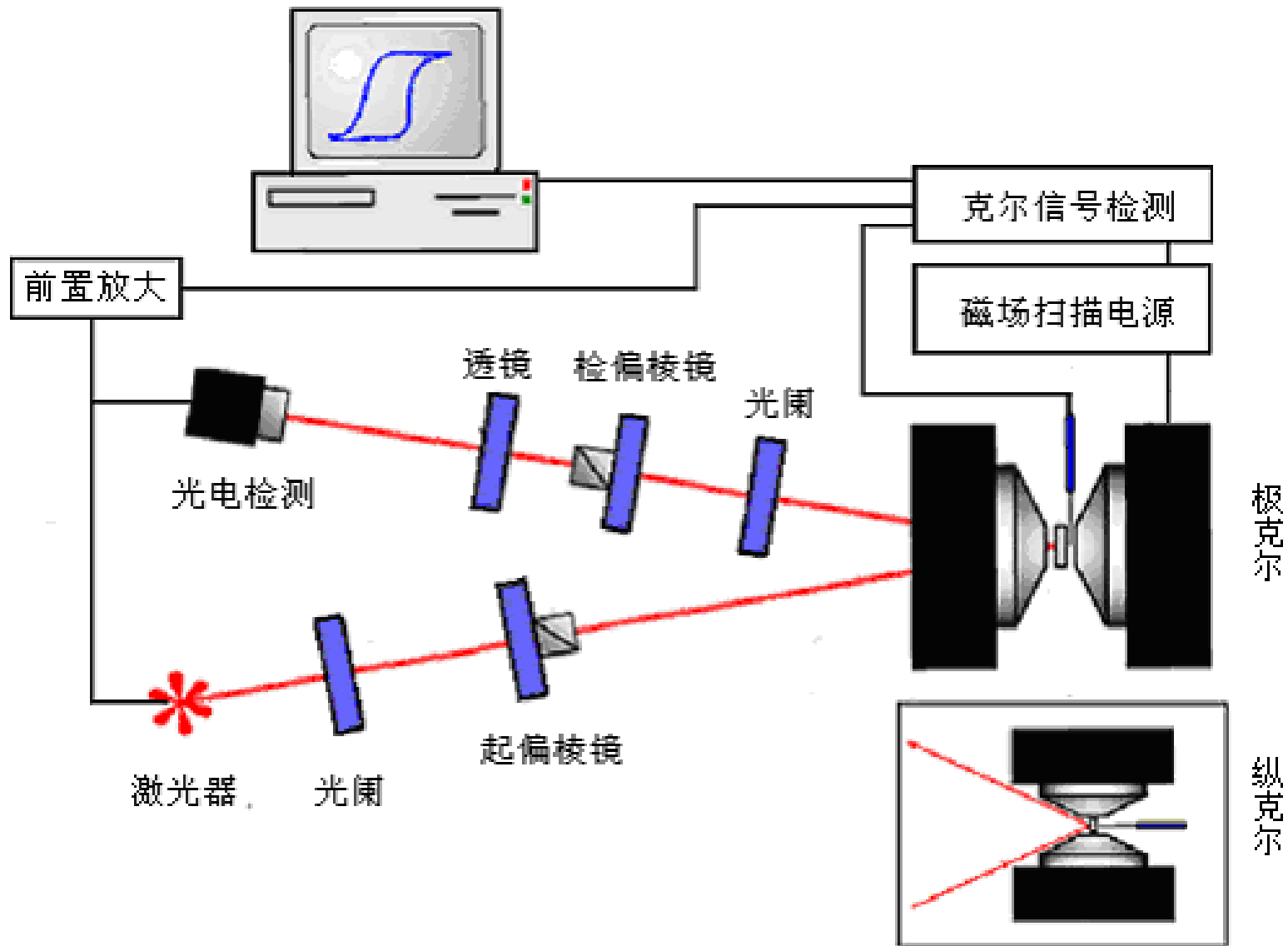


图5 常见SMOKE系统的光路图

2. 实验原理——SMOKE系统的光路图

现在，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-氖激光器发射出的激光束，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。

2. 实验原理 — SMOKE系统中偏振棱镜的状态设置

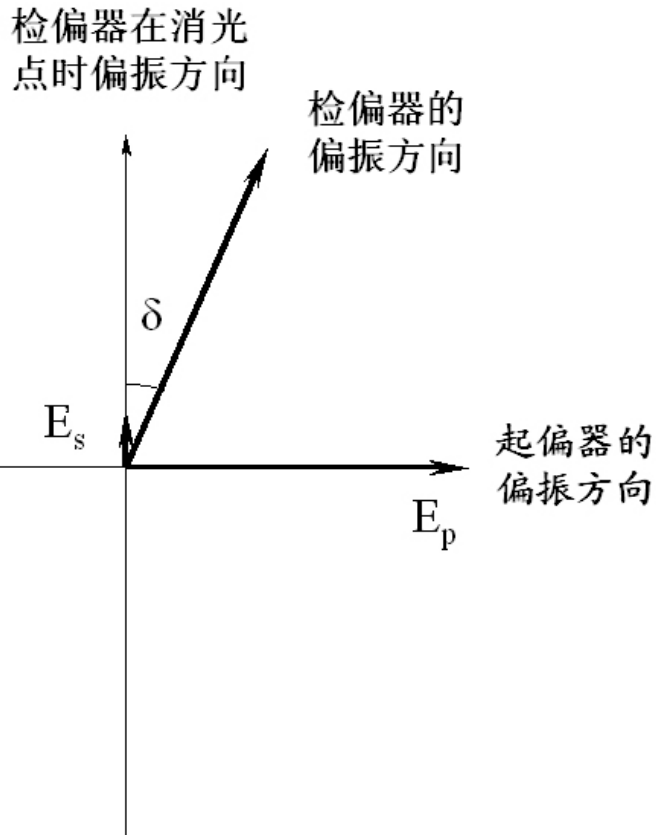


图6 偏振器件配置

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，就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。

反射光偏振面旋转方向和 δ 同向时，则光强增大，反向时，则光强减小，因此，样品的磁化方向可以通过光强的变化来区分。

2. 实验原理——SMOKE的数学推导

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：

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

2. 实验原理——SMOKE的数学推导

将（1）式代入（2）式得到：

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

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

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

整理得到（省略二阶项后，考虑到探测器测量的是(4)式的实数部分）：

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

无外加磁场下：

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

2. 实验原理——SMOKE的数学推导

所以有：

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

移项得在样品达磁饱和状态下克尔旋转角 θ_k 为：

$$\theta_k = \frac{\delta}{2} \frac{I - I_0}{I_0}$$

实际测量时，最好测量磁滞回线中正向饱和时的克尔旋转角 θ_{+k} 和反向饱和时的克尔旋转角 θ_{-k} ，那么 θ_k

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

2. 实验原理——SMOKE的数学推导

$I(+M_s)$ 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。

由于 θ_k 近似正比于磁化强度 M ，所以可通过对光强的测量，得到磁化强度的相对值。于是，通过改变外加磁场，即得到磁滞回线。

2. 实验原理——SMOKE的数学推导

当要测量克尔椭偏率 ε_k 时，只要在检偏器前放置一个四分之一波片，它可以产生 $\pi/2$ 的相位差，所以检偏器看到 $i(\theta_k + i\varepsilon_k) = -\varepsilon_k + i\theta_k$ ，而不是 $\theta_k + i\varepsilon_k$ ，因此测量到的信号为克尔椭偏率 ε_k 。

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。

2. 实验原理——SMOKE的数学推导

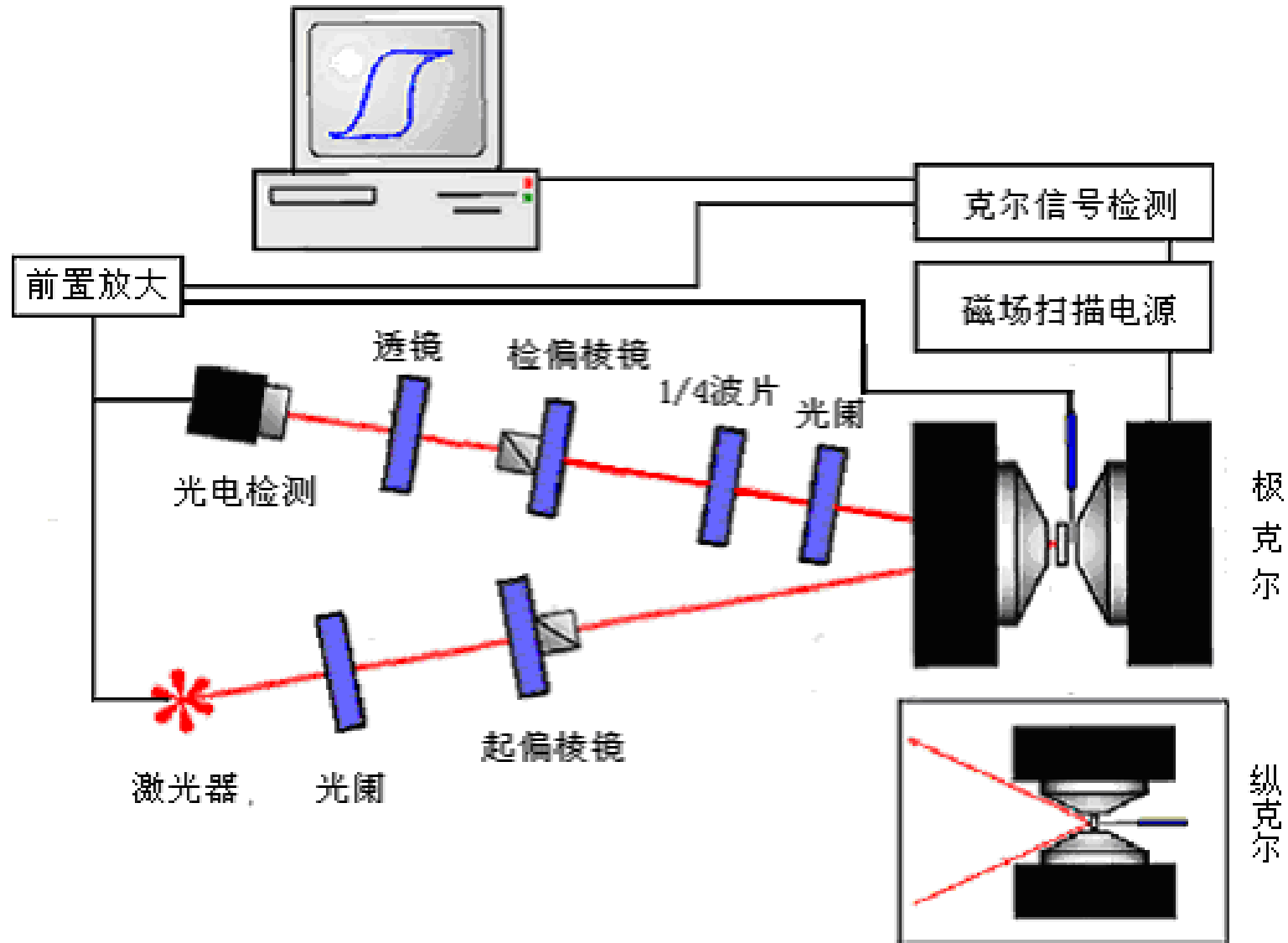


图7 SMOKE系统测量椭偏率的光路图

2. 实验原理——SMOKE的数学推导

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：

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

经过推导可得，在饱和情况下 ε_k 为：

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

3. 实验仪器装置简介

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。

3. 实验仪器装置简介

测量系统常常是由以下5部分组成：

(1) 光学减震平台。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。

(2) 光路系统，包括输入光路与接收光路。激光器用普通半导体激光器，起偏和检偏棱镜都用格兰-汤普逊棱镜，光电检测装置由孔状可调光阑、干涉滤色片和硅光电池组成。格兰-汤普逊棱镜的机械调节结构由角度粗调和螺旋测角组成，测微头的线位移转变为棱镜转动的角位移。测微头分度值为0.01 mm，转盘分度值为 1° ，通过测微头线位移的角位移定标可知其测量精度在 $2'$ 左右。

3. 实验仪器装置简介

(3) 励磁电源主机和可编程电磁铁。励磁电源主机可选择磁场自动和手动扫描。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，转台可以每隔转动定位，同时支架中间的样品固定座也可以定位转动，这样可以在极向克尔效应和纵向克尔效应之间转换测量。

(4) 前级放大器和直流电源组合装置：**a)** 将光电检测装置接收到的克尔信号作前级放大，并送入信号检测主机中。**b)** 将霍尔传感器探测到的磁场强度信号作前级放大并送入检测装置。**c)** 为激光器提供精密稳压电源。

3. 实验仪器装置简介

(5) 信号检测主机。将前置放大器传来的克尔信号及磁场强度信号进行二级放大，分别经 A/D 转换后送计算机处理，同时用数字电压表显示克尔信号及磁场强度信号的大小。 D/A 提供周期为 20 s 、 40 s 、 80 s 准三角波。作为励磁电流自动扫描信号。

3. 实验仪器装置简介

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。

4. 实验测量结果

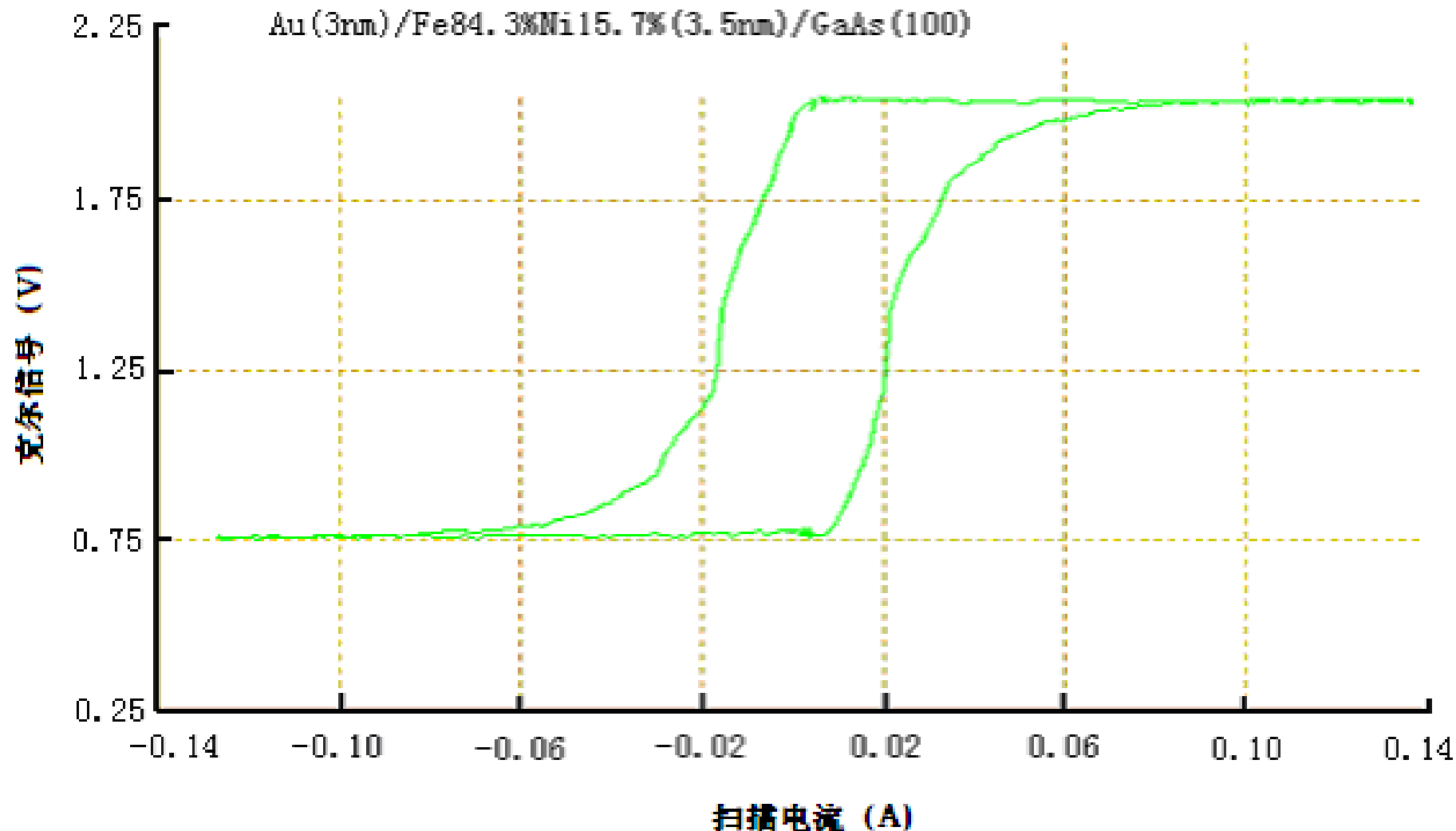
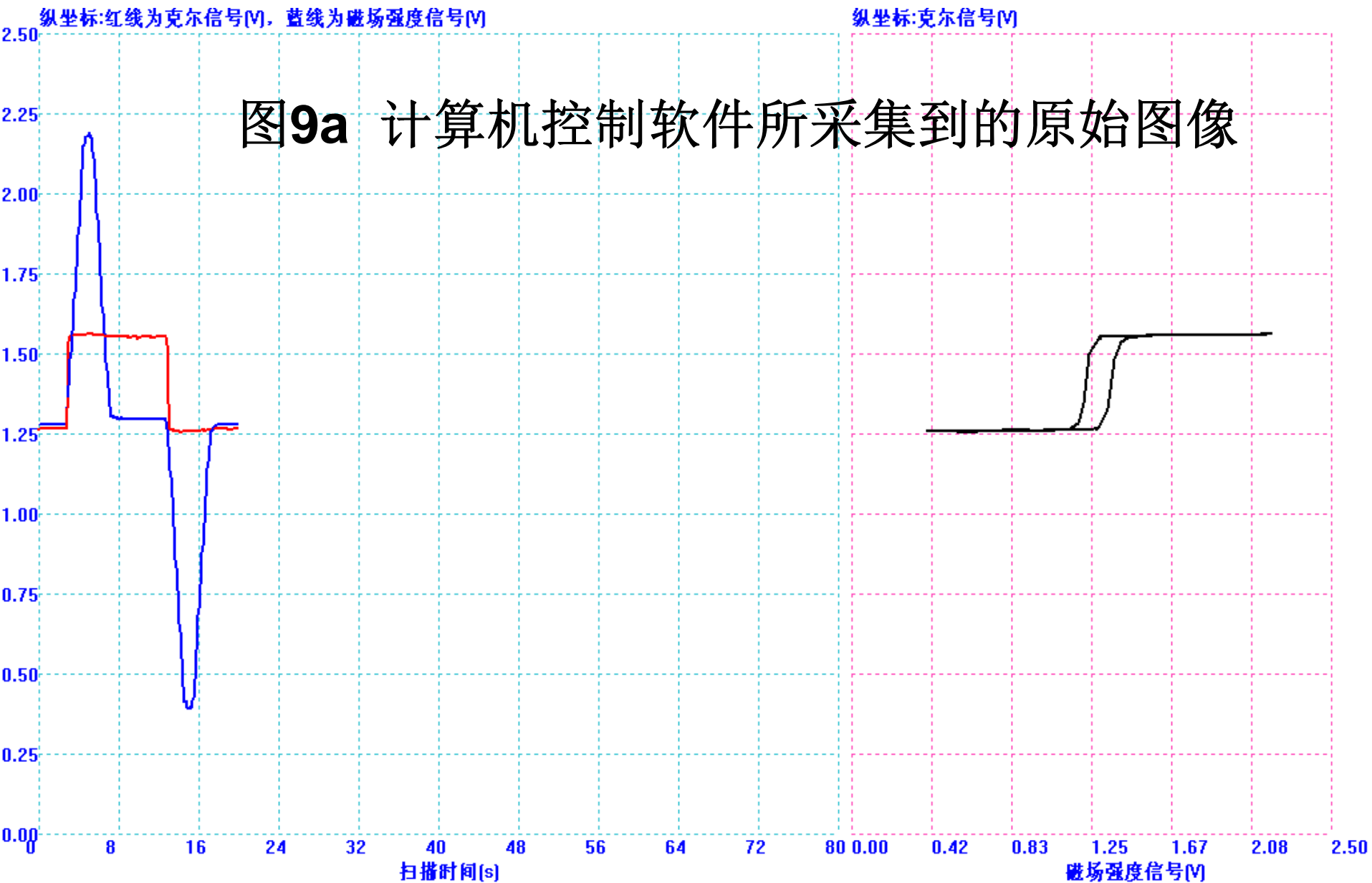


图8 表面磁光克尔效应实验扫描图

4. 实验测量结果



4. 实验测量结果

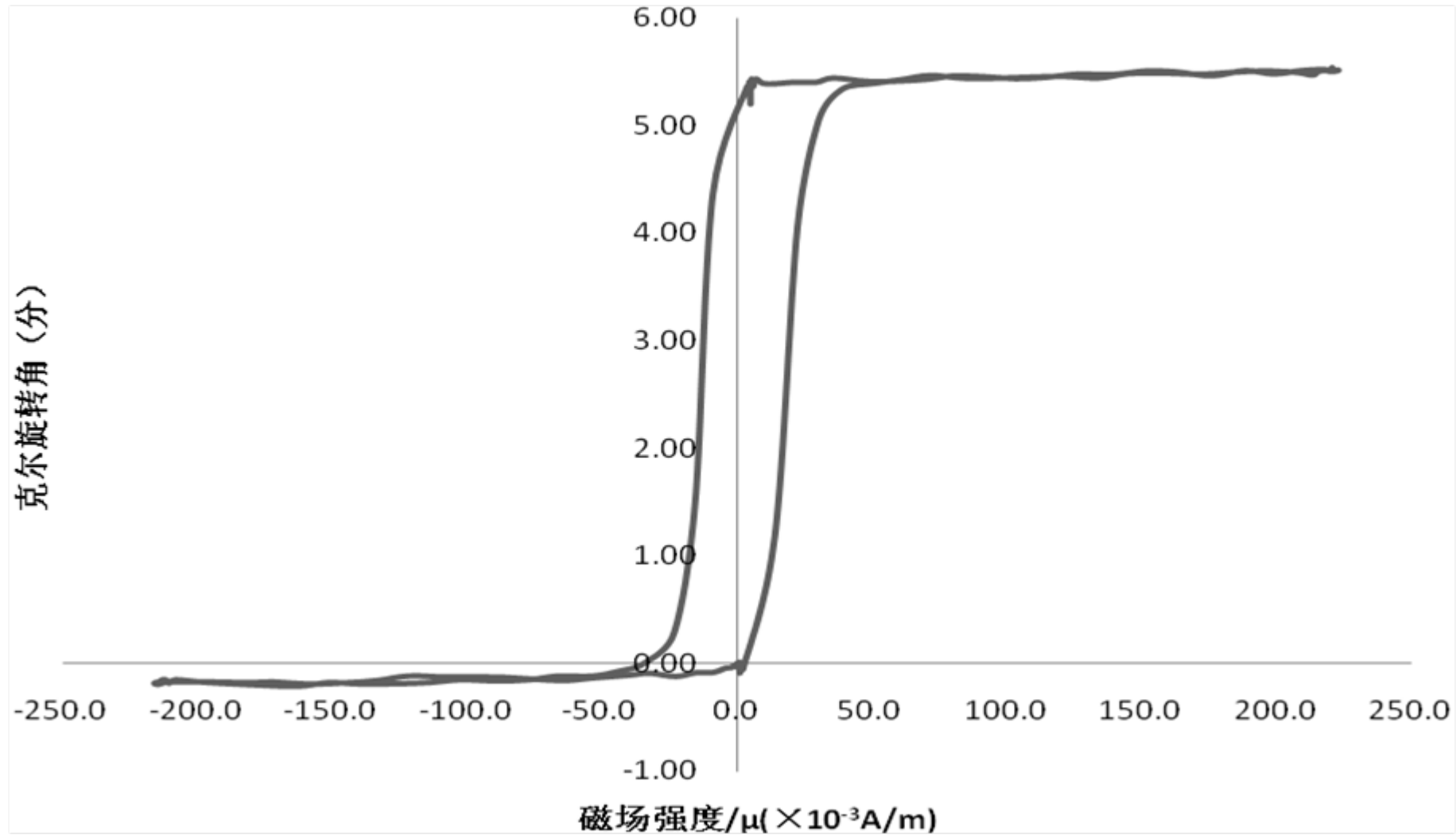


图9b 定标之后的克尔旋转角与磁场强度关系曲线

4. 实验测量结果

— 一样品所在处磁感应强度 B_1 与霍耳传感器探测到的磁场强度 B_2 的关系

手动改变励磁电流从0~10.00 A 变化，每间隔0.5 A 用数字式特斯拉计测量电磁铁两极中心处的磁感应强度 B_1 ，同时记录信号检测主机上霍耳传感器探测到的磁感应强度 B_2 的大小， B_2 是以电压大小表示的。

实验结果如表1 所示。

4. 实验测量结果

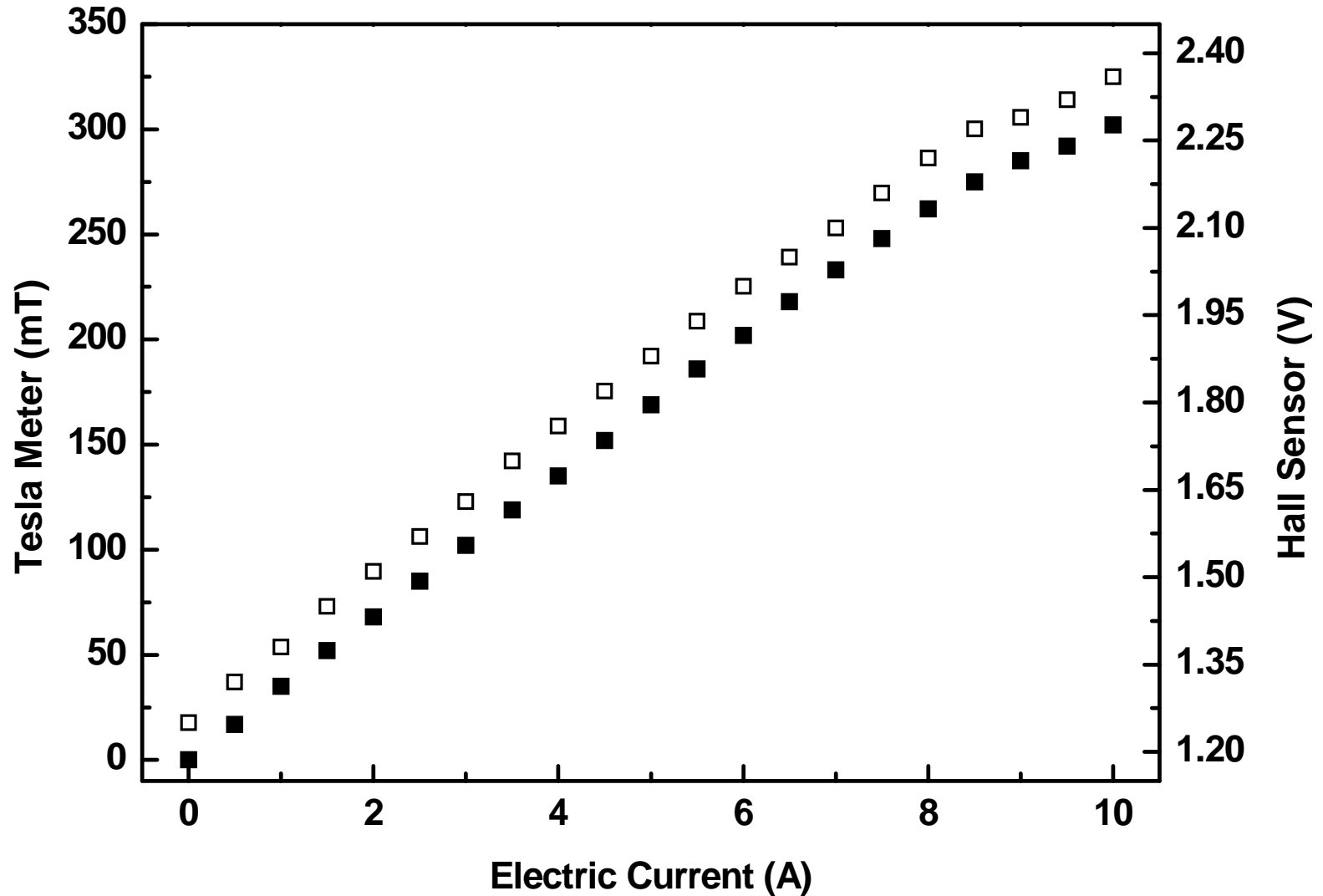


图11 样品所在处磁感应强度与霍尔传感器测量到的磁感应强度的关系

4. 实验测量结果

表1 B_1 与 B_2 的关系

Tab. 1 The relationship between B_1 and B_2

电流/A	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
B_1 /mT	0	17	35	52	68	85	102	119	135	152	169
B_2 /V	1.25	1.32	1.38	1.45	1.51	1.57	1.63	1.70	1.76	1.82	1.88
电流/A	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	-
B_1 /mT	186	202	218	233	248	262	275	285	292	302	-
B_2 /V	1.94	2.00	2.05	2.10	2.16	2.22	2.27	2.29	2.32	2.36	-

从表1 测量数据可看出，两磁极间的磁感应强度最大可达302 mT，在整个测量范围内，用计算机求得 B_1 与 B_2 的相关系数为0.997，而在0~8.50 A 的范围内， B_1 与 B_2 的相关系数为0.999 (86)。这说明：样品所在位置处的磁感应强度与实验中霍尔传感器在线探测到的磁场强度有很好的线性关系。

4. 实验测量结果

利用该系统已测量软铁、硅钢片、不锈钢、玻莫合金薄膜、硅基镀铝膜、不同材料的多层膜等多种铁磁质材料及其薄膜的磁滞回线，限于篇幅，不一一列举。

这里仅给出玻莫合金薄膜样品和不锈钢材料在纵向克尔模式下的磁滞回线，分别如图12和图13所示。表3是这两种材料的实验数据记录，其中克尔旋转角分别为 0.0282° 、 0.0635° 。

表3 玻莫合金薄膜和不锈钢样品实验记录

Tab. 3 The experimental track records about the permalloy magnetoresistance films and stainless steel

	$I(+M_s)/V$	$I(-M_s)/V$	I_0/V	$\Delta I/V$	$\delta/(\circ)$	$\theta_k/(\circ)$
玻莫合金薄膜	2.02	1.00	1.51	1.02	0.167	0.028 2
不锈钢	1.69	1.04	1.365	0.65	0.533	0.063 5

4. 实验测量结果

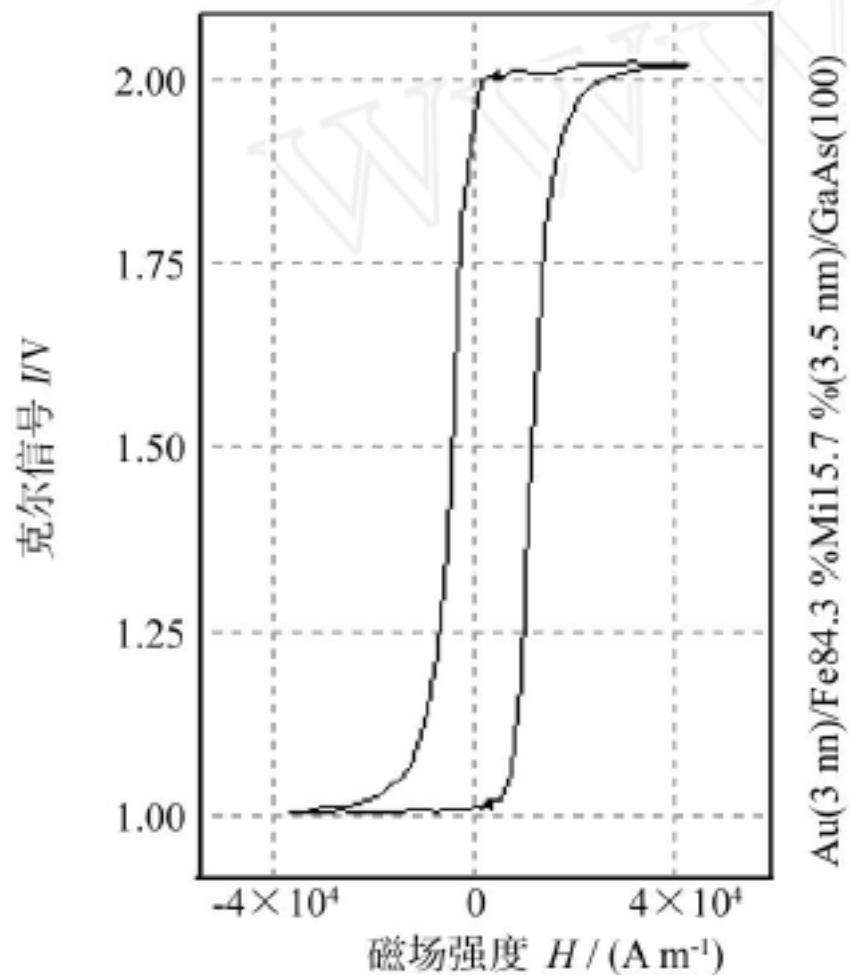


图12 玻璃合金薄膜的磁滞回线图样

4. 实验测量结果

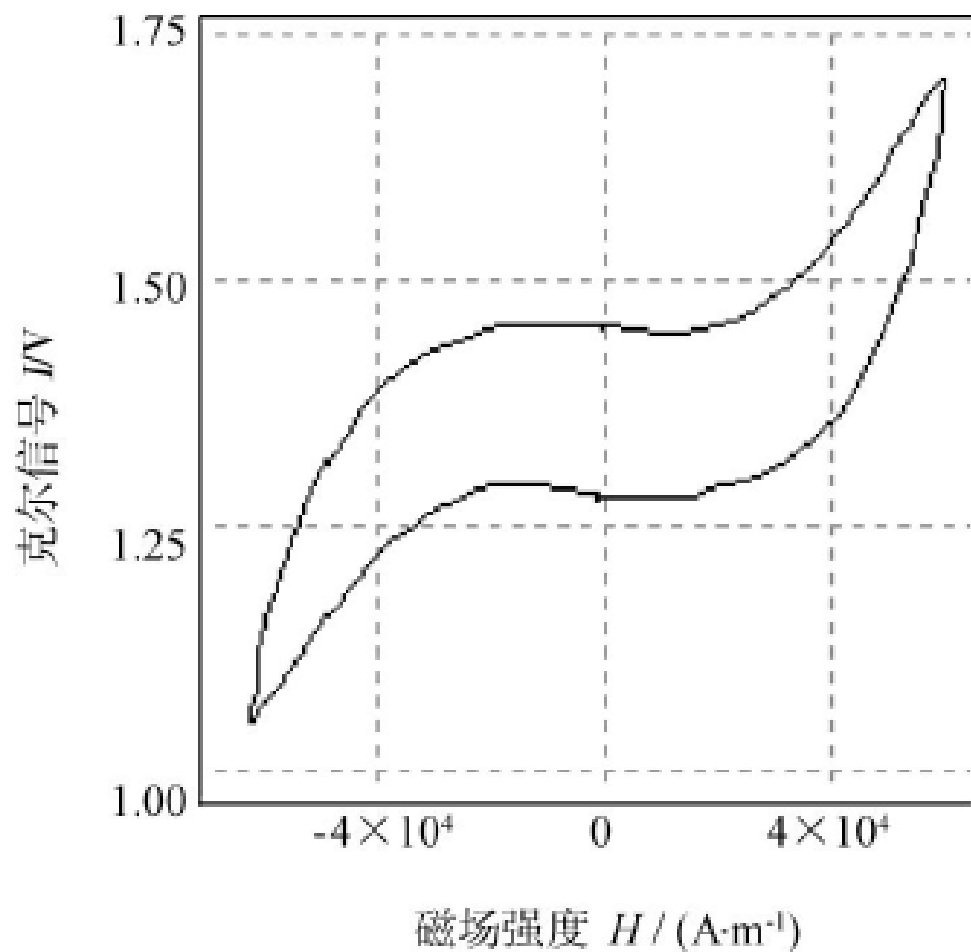


图13 不锈钢的磁滞回线图样

4. 实验测量结果

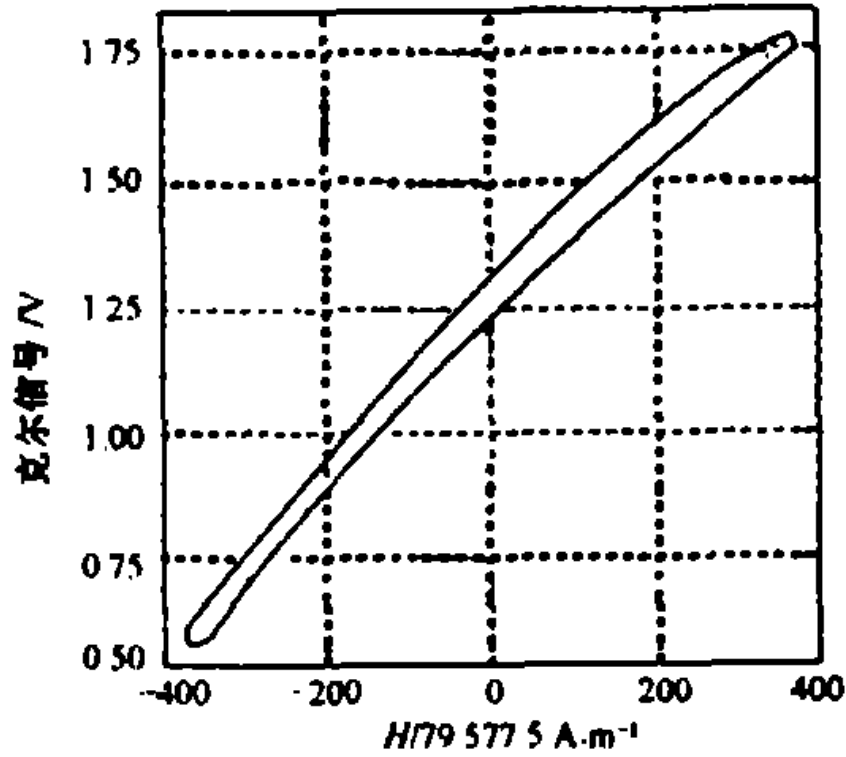


图14 纯铁的磁滞回线图样

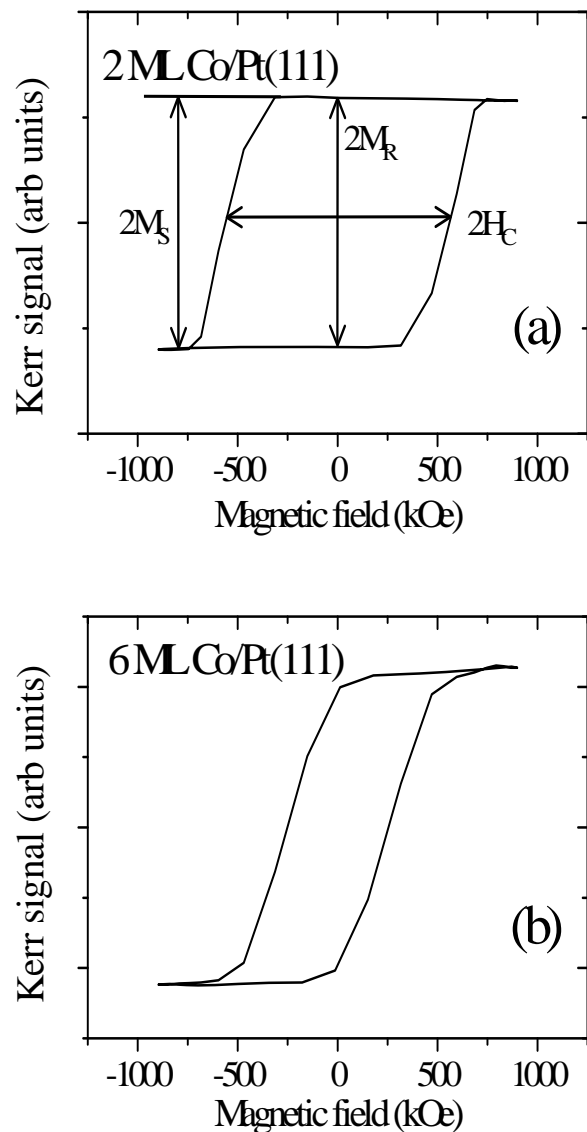
由图中可以得出：
在 H 达 400×79.5775
 A/m 时，纯铁样品还
没有达到完全饱和的
情况，纯铁的磁滞损
耗却很小。

5. 表面磁光克尔效应在超薄膜磁性之应用

由于对称性的破坏，超薄膜材料的物理性质有别于块材性质，磁性性质也不例外，由于表面磁光科尔效应具有可达原子层厚度之磁性分辨率，接着将针对超薄膜磁性性质研究，讨论表面磁光克尔效应测量之应用：

磁滞曲线特性、
磁异向性、
磁性相变、
合金材料磁性性质。

5. 表面磁光克尔效应在超薄膜磁性之应用



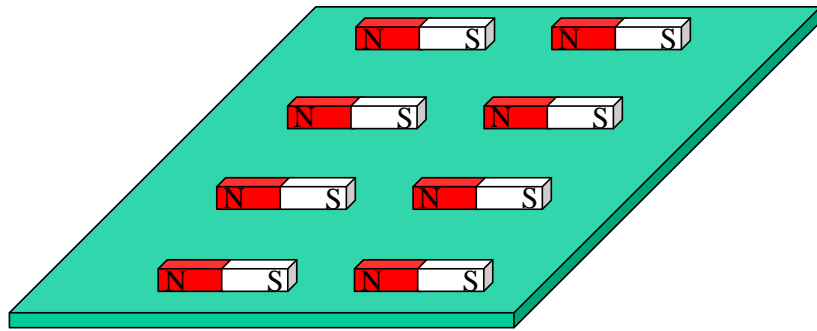
由表面磁光科尔效应研究两原子层Co/Pt(111)系统可得其极向磁滞曲线，如图15(a)所示。决定薄膜磁性特性有三个重要参数，分别为剩磁 M_R 、矫顽力 H_C 与饱和磁化 M_S ，在磁滞曲线中可以分别定义出来；虽然表面磁光科尔效应量测所决定出来的残磁与饱和磁化并非绝对值大小，然而实验上可以固定雷射入射角、雷射强度、样品位置等变因，而得到残磁、饱和磁化与膜厚或是加热温度的关系图；磁滞曲线方形度(squareness)定义为 M_R/M_S ，当薄膜趋向于平整与层状成长，其残磁与饱和磁化趋近于相等，也就是方形度约为1，如此则薄膜便显现出单一化扇区行为；对于两原子层Co/Pt(111)超薄膜而言，由图15(a)可见其方形度为1，但是当薄膜厚度渐增达6原子层时，残磁与饱和磁化不再相等，如图15(b)所示，其磁滞曲线方形度约为0.9，反应出薄膜厚度不再均匀，甚至有丛聚现象(clustering)产生。

图15 (a) 2原子层与 (b) 6原子层Co/Pt(111)之极向磁滞回线。

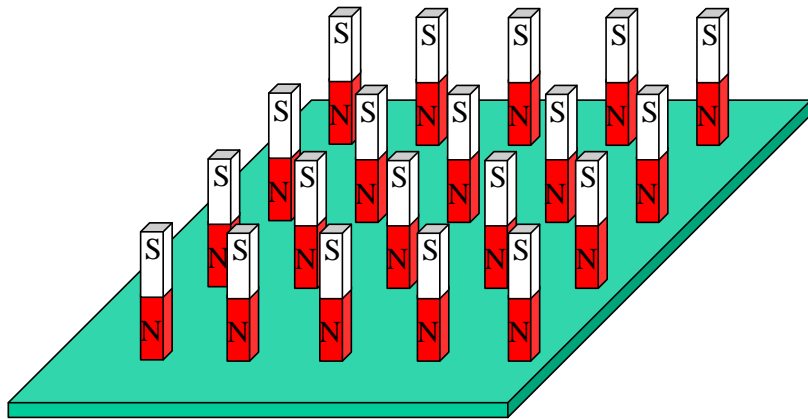
5. 表面磁光克尔效应在超薄膜磁性之应用

对于薄膜样品而言，由于形状异向性（**shape anisotropy**）的缘故，其磁化异轴常常是平躺于样品表面方向；然而当样品厚度逐渐缩小到仅为几个原子层的超薄膜极限情况下，在某些材料系统中，由于自旋-轨道作用（**spin-orbital interaction**）产生磁晶异向性（**magnetocrystalline anisotropy**）的贡献，磁化异轴可能由平躺于样品表面方向转变为垂直于样品表面方向，如此的垂直异向性材料有助于工业应用之高密度磁性纪录材料与超微小读写头的开发与制作。

5. 表面磁光克尔效应在超薄膜磁性之应用



M in plane, low density.



M perpendicular to the plane, high density.

以小磁铁棒在一平面基底上之排列为例，由于磁极间作用力之影响，磁极排列间距不能无限制地缩小，在一定的磁极间距情况下，如图16所示，可见到磁铁棒磁极以垂直方向排列其面密度将大于水平方向排列。

图16 磁铁棒磁极以垂直方向排列其面密度将大于水平方向排列。

5. 表面磁光克尔效应在超薄膜磁性之应用

图17显示的是随Co厚度增加，Co/Pt(111)超薄膜的极向与纵向磁光克尔效应讯号强度的变化情形，外加磁场最大值为1 kOe。

当薄膜厚度小于3原子层的情况下，只有极向磁光克尔效应讯号被观察到，而纵向磁光克尔效应讯号强度为零，显示在此厚度范围内，Co/Pt(111)超薄膜呈现垂直磁异向性；当薄膜厚度大于6.5原子层时，只有纵向克尔讯号存在，超薄膜磁异向性转变为平行于样品表面方向，显现出厚膜中形状异向性主导磁性行为之现象；在4.5到5.8原子层厚度间极向与纵向讯号皆存在，为磁化易轴转变厚度区，此区域中形状异向性与磁晶异向性皆无法单独支配薄膜磁异向性。

5. 表面磁光克尔效应在超薄膜磁性之应用

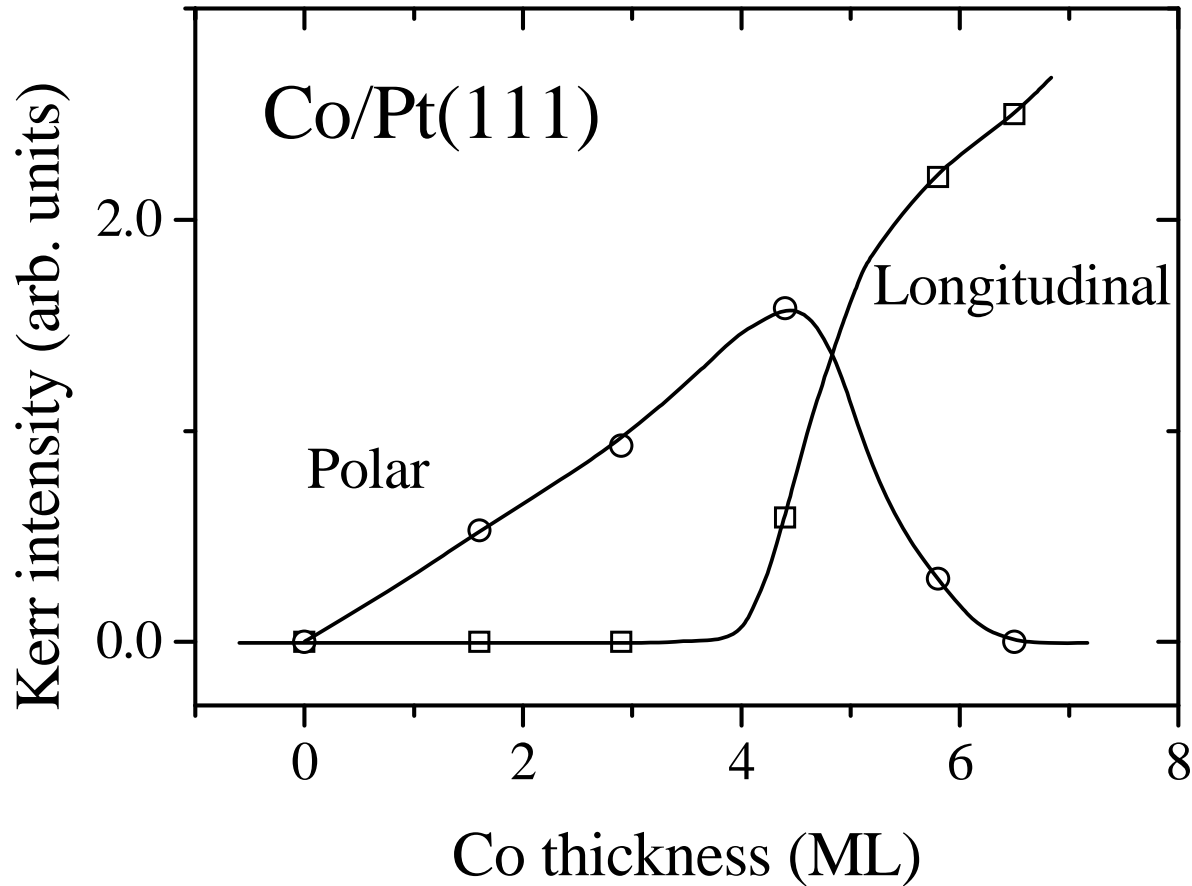


图17 Co/Pt(111)超薄膜的极向与纵向磁光克尔效应讯号强度随Co厚度增加的变化情形。

磁晶各向异性

在铁磁或者亚铁磁材料中，自发极化主要来源于自旋间的交换作用。

这种交换作用本质上是各向同性的，所以在没有外场时，晶体中的自发磁化强度的排列理应可以沿任意方向。

然而，在实际的铁磁或者亚铁磁材料中，自发磁化强度总是沿着某一个或者某几个特定的方向。

只有当外场存在时，磁化强度才有可能偏离这些方向。这种现象即磁晶各向异性。

磁晶各向异性的测量

对于磁晶各向异性的测量方法有两种：

1. 转矩磁强计测量；

2. 旋转磁场磁光克尔效应（RotMOKE）等方法。

特点：

利用转矩磁强计测量磁各向异性最为精确，而RotMOKE方法较为方便和使用。

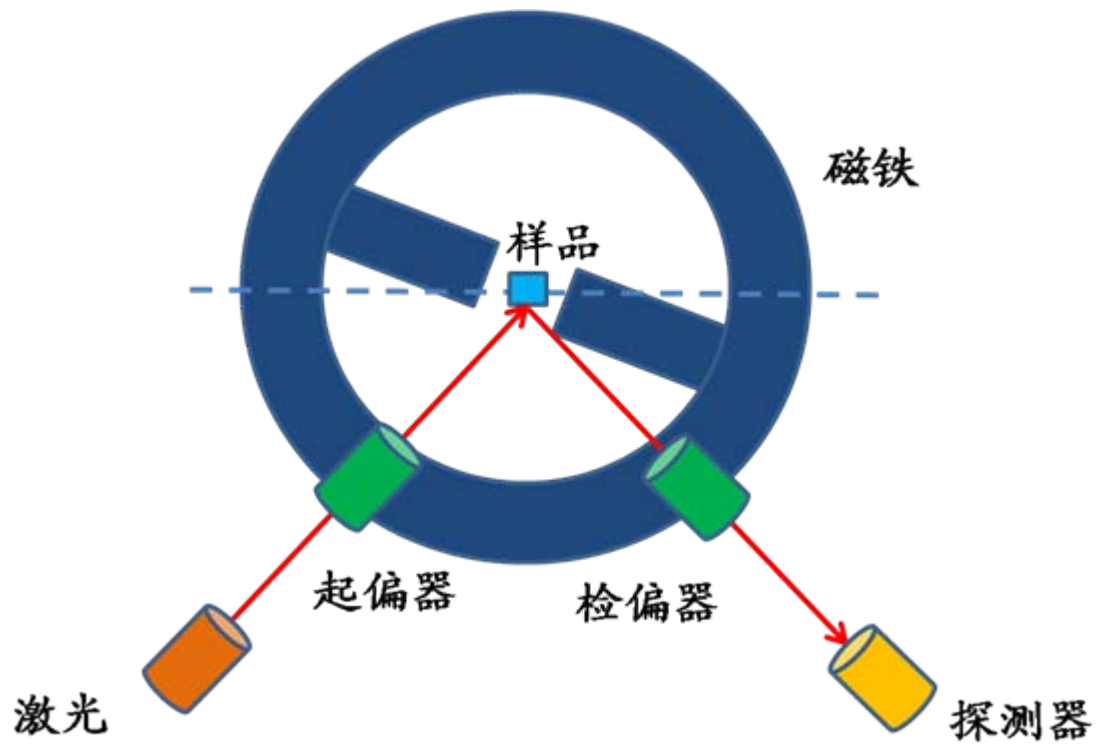
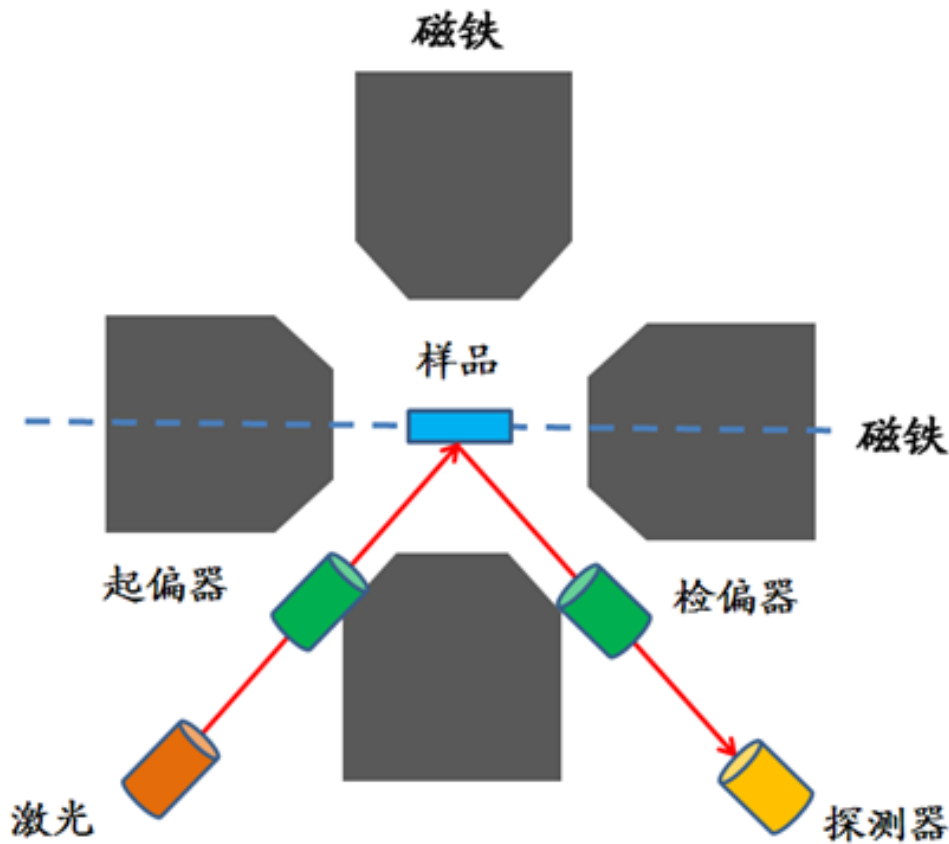


图18 原有系统测量示意图

实验室原有一套功能较为完备的磁光克尔效应系统，可利用表面磁光克尔效应的方法

(SMOKE) 定性测量磁滞回线，也可利用旋转磁场磁光克尔效应的方法

(RotMOKE) 定量测量磁晶各向异性。但是系统是通过机械转动电磁铁来得到旋转磁场的，如图18所示，由此引入的机械振动会带来很大问题。



新型磁光克尔效应测量系统是在原有测量系统的基础上，对旋转磁铁进行改进，用两个互相垂直的电磁铁代替原来的磁铁，通过计算机程序控制两个电磁铁的大小使得合成磁场旋转，代替了原系统磁铁的机械旋转，如图19所示。

图19 新型系统测量示意图

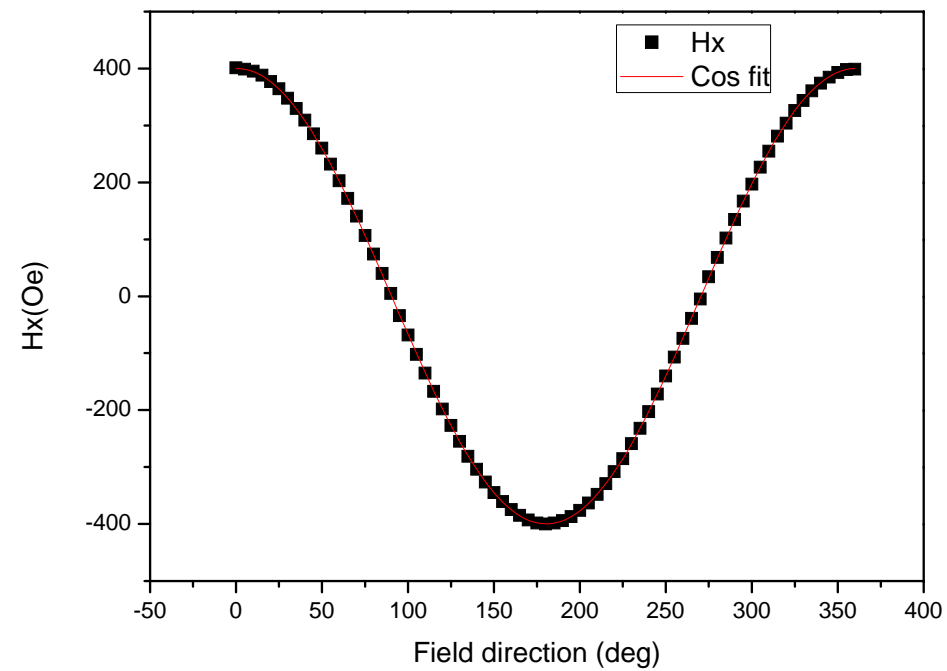


图20 旋转磁场的水平分量

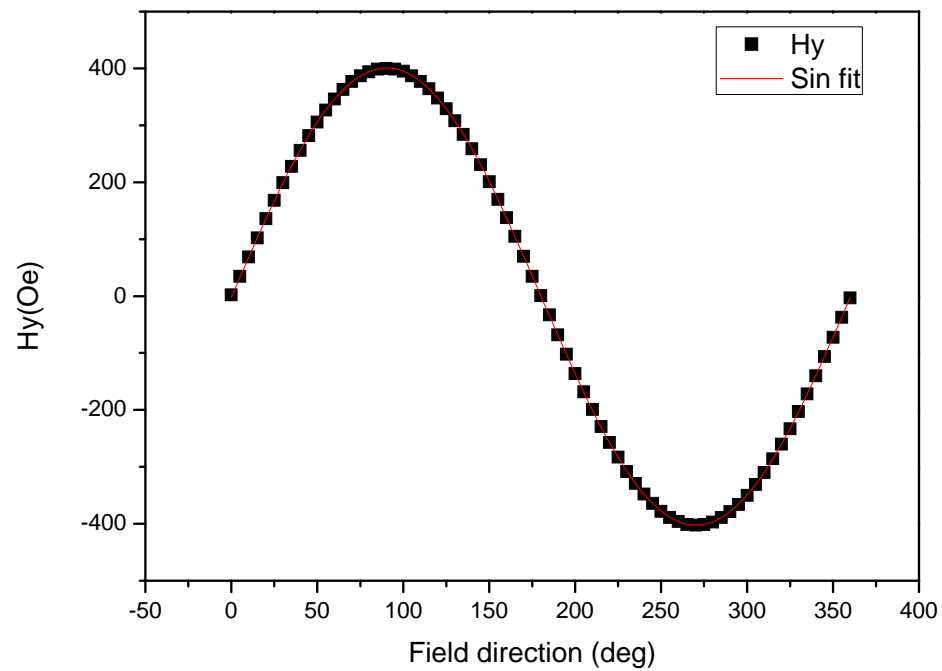


图21 旋转磁场的垂直分量

对以上两条曲线先求平方和，再求二次根，得到合成磁场的大小随旋转角度的变化关系。

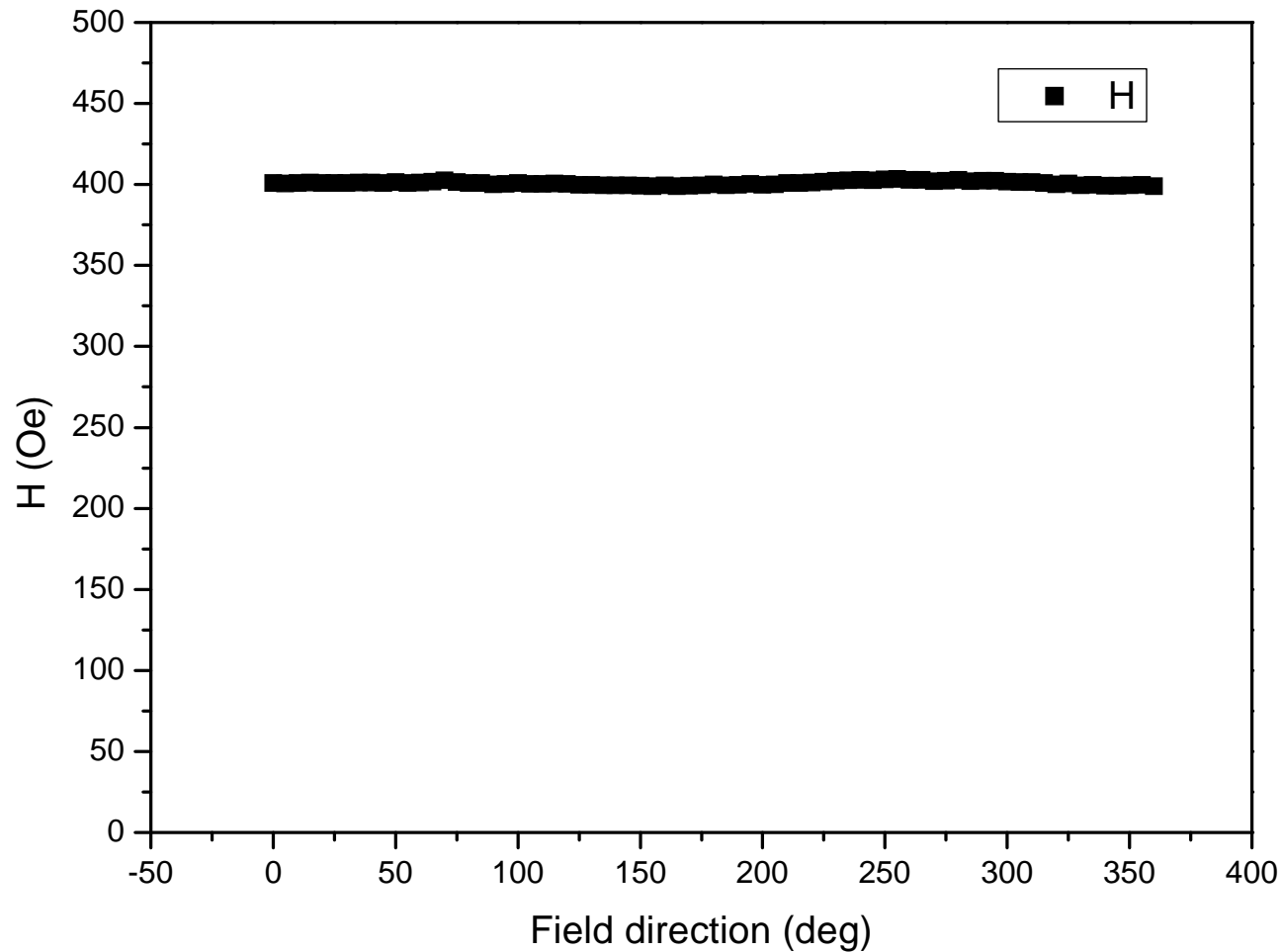


图22 旋转磁场大小的变化

新型测量系统的优势

新型磁光克尔效应测量系统的改进在于磁铁控制部分，该测量系统只需通过计算机控制电源输出电流的大小和方向就可以实现对磁场的控制，即可以产生平面内任意方向、任意大小（一定范围内）的磁场，并可以通过设置横向磁场与纵向磁场的变化关系，得到可在面内快速旋转的合成磁场。

新系统不需要进行机械转动就可以实现磁场在面内的任意旋转，消除了机械振动，可以在旋转磁场的同时直接测量克尔信号，可以大幅度缩短测量时间；新系统也能减小测量噪音，减小激光漂移对实验的影响，减少了周围环境对样品的影响，从而增大测量的准确度。

这样，结合磁光克尔效应（MOKE）和旋转磁场磁光克尔效应(RotMOKE)原理，就可以准确、高效地得到样品的磁信号和磁晶各向异性场。

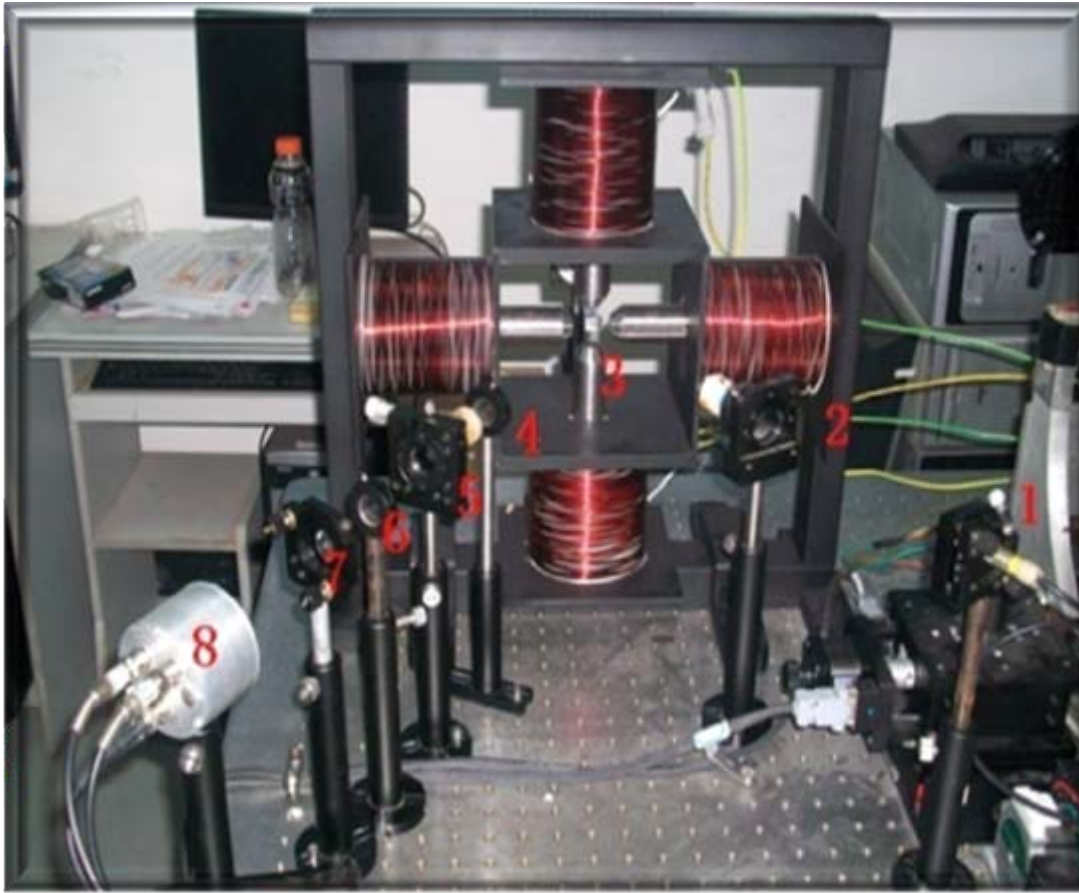


图23 光路原件实物图

1. 激光
2. 起偏器
3. 样品
4. 光阑
5. 检偏器
6. 光阑
7. 聚焦透镜
8. 光电探头

如图23所示，激光通过起偏器打到样品上，样品置于电磁铁磁场均匀的位置，反射光依次通过光阑、检偏器、光阑和聚焦透镜打到光电探头上。

起偏器与检偏器的作用是探测克尔信号；光阑的作用是过滤掉部分杂散光；聚焦透镜的作用是缩小光斑，便于局域测量。

6. 结束

将表面磁光克尔效应实验技术引入近代物理实验，可使学生：

1. 了解前辈科学家是如何利用磁光克尔效应测量磁性薄膜磁滞回线和磁参量的，

2. 认识到**SMOKE**实验方法的先进性，特别是该实验能联系真空涂膜技术、磁光测量技术和纳米磁光薄膜参量的测量，

3. 促使学生在近代物理实验中，领悟和学习前沿学科的尖端技术，将激发学生学习的积极性，有利于教学内容与现代科研中纳米磁光薄膜测量技术相结合，为学生提供更多实践和研究能力培养的题材。

因此，**SMOKE** 实验非常适合引入到近代物理实验中，成为一个与现代科学相结合的研究性实验。

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。
7. 赵凯华, 新概念物理教程·光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
8. 廖延彪, 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

欢迎指正！

谢谢！

奖状

复旦大学物理系、复旦天欣科教仪器公司 董国胜、陈希江、陆中龙、刘平安、胡顺全 所研制的 FD-SMOKE-B 表面磁光克尔效应实验系统 在“第五届全国高校物理实验教学研讨会”上荣获教学仪器评比 一等奖。

高等学校物理学会专业教学指导分委员会
2003年10月30日

上海市重点新产品 证书

项目名称：FD-SMOKE表面磁光克尔效应测量系统

项目编号：09XP0518700

承担单位：上海复旦天欣科教仪器有限公司

有效期：三年

上海市科学技术委员会

二〇〇九年四月

合作研制成功的产品“FD-SMOKE 表面磁光克尔效应测量系统”
被上海市科委评为上海市重点新产品，编号：09XP0518700