

交换偏置各向异性的定量测量

刘方泽 0530092 黄鑫 0557005

摘要: 本文研究了利用纵向磁光克尔效应(Longitudinal magneto-optical Kerr effect, LMOKE)结合旋转磁场的方法(LMOKE with a rotating field, ROTMOKE)定量测量 Co/IrMn 双层膜中交换偏置各向异性的可能性,通过与 LMOKE 的测量结果比较,我们认为很难通过 ROTMOKE 方法得到准确的交换偏置各向异性常数,原因是受 IrMn 反铁磁层的影响,铁磁层 Co 成为多畴态并且易轴方向会随外磁场的转动而发生变化。

关键词: 交换偏置, 磁光克尔效应

1. 引言

在磁场中沉积铁磁(FM)/反铁磁(AFM)双层膜或将FM/AFM体系在恒定外磁场中从温度 T (T 高于奈尔温度(T_N)而低于居里温度(T_C)),冷却至低于 T_N 后,FM/AFM界面发生交换耦合作用,体系的磁滞回线沿磁场反方向偏移原点,同时伴随有矫顽场(H_C)的增加,这一现象称为交换偏置,偏移量称为交换偏置场(H_E),如图1。1956年Meiklejohn和Bean在研究被CoO包裹的Co颗粒时首次发现了这一现象^[1],近年来由于FM/AFM双层膜在自旋阀巨磁电阻器件以及磁记录领域具有重要应用价值^[2],对其物理性质的研究也成为了人们关注的热点之一。

交换偏置体系的能量密度可表示为:

$$E = -M_{FM} H \cos \varphi + K_{FM} \sin^2 \varphi + J_{INT} \cos(\varphi - \beta) \quad (1)$$

其中 H 是外磁场, M_{FM} 是铁磁层饱和磁化强度, K_{FM} 是铁磁层各向异性常数, J_{INT} 交换耦合系数, φ 和 β 分别是铁磁层和反铁磁层磁化强度与易轴的夹角。当 E 取最小值时有:

$$J_{INT} \propto M_{FM} H_E \quad (2)$$

其中 M_{FM} 是铁磁层饱和磁化强度, H_E 即交换偏置各向异性常数,是交换偏置现象中的一个重要参数,但是目前定量测量 H_E 的方法并不多。1999年Mattheis等提出了用ROTMOKE方法准确测量铁磁薄膜的各向异性常数的方法^[3],受此启发,我们希望将ROTMOKE应用于定量测量 H_E ,如果能够成功,对于交换偏置的研究将有很大帮助。

本文讨论了用ROTMOKE方法测量Co/IrMn双层膜交换偏各向异性的实验方法,对实验数据的分析表明用ROTMOKE很难准确测得交换偏置各向异性常数。

2. 实验原理与装置

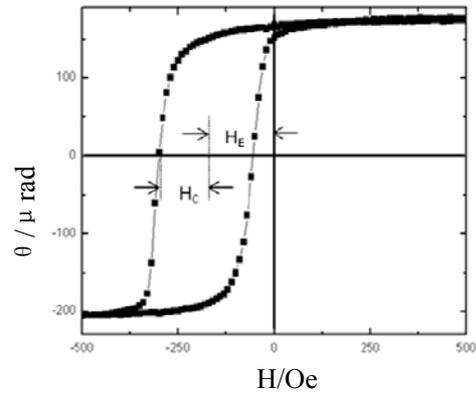


图1 利用纵向磁光克尔效应测得的 Co (38Å) / IrMn (19Å) 双层膜常温下的磁滞回线及相应的 H_C 和 H_E 。

实验样品IrMn/Co尺寸为48mm×18mm，由磁控溅射设备完成。先在 Si 衬底上溅射一层 Cu(127.5Å)缓冲层来诱导反铁磁层 IrMn 的 (111) 晶向，IrMn层为沿衬底纵向的楔形，厚度0-30 Å，之上是铁磁层Co(38 Å)，其易轴沿IrMn梯度方向，最后沉积一层Cu(42.5 Å)以防止氧化。在整个制备过程中，样品始终处于平行于IrMn梯度方向的外磁场内，因此AFM层中便诱导产生了单向各向异性。

假设样品中Co是单畴态，IrMn层磁矩方向与Co易轴方向相同并且固定不变，那么样品置于外磁场中时的能量密度可表示为：

$$E = -M_S H \cos(\alpha - \varphi) + K_u \sin^2 \varphi - M_S H_{ex} \cos \varphi \quad (3)$$

其中 K_u 是单轴各向异性常数， M_S 是饱和磁化强度， H_{ex} 表示交换偏置各向异性常数， V 是铁磁层体积， H 是外磁场， α 、 φ 分别是 H 和 M_S 与易轴(ea)方向的夹角，如图2(a)，等式右侧第一项表示FM层在 H 中的能量，第二项表示FM层单轴各向异性性能，第三项表示FM层在 H_{ex} 中的能量。将(3)式对 φ 求导数并令其等于零便有：

$$HM_S \sin(\alpha - \varphi) = K_u \sin 2\varphi + H_{ex} M_S \sin \varphi \quad (4)$$

令 $H_{Ku}=2K_u/M_S$ 得到：

$$H \sin(\alpha - \varphi) = \frac{1}{2} H_{Ku} \sin 2\varphi + H_{ex} \sin \varphi \quad (5)$$

由于

$$L(\alpha) = HVM_S \sin(\alpha - \varphi) \quad (6)$$

其中 L 是转矩，可令 $l=L/VM_S$ ，于是：

$$l(\alpha) = H \sin(\alpha - \varphi) = \frac{1}{2} H_{Ku} \sin 2\varphi + H_{ex} \sin \varphi \quad (7)$$

考虑到实际测量时的误差，在上式中加入误差项 a 和 x_0 ，成为：

$$l(\alpha) = a + H \sin(\alpha - \varphi) = a + \frac{1}{2} H_{Ku} \sin 2(\varphi - x_0) + H_{ex} \sin(\varphi - x_0) \quad (8)$$

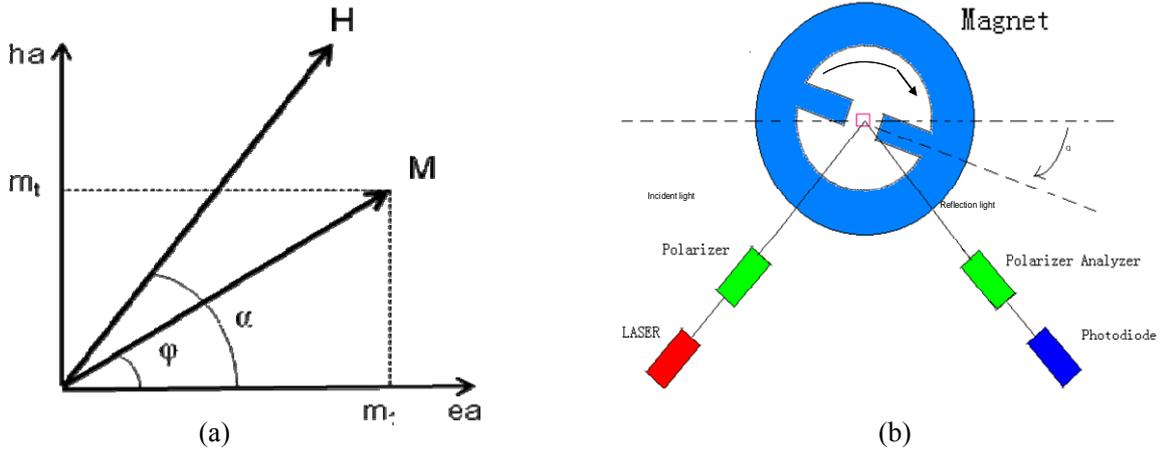


图2 (a) 磁场 H 与归一化的磁化强度 M 示意图，(b) ROTMOKE 实验装置示意图

(8)式中 H 和 α 已知，只需求出 φ 便可通过 $l(\alpha)$ 对 φ 拟合得到 H_{Ku} 和 H_{ex} ，为此可使用纵向磁光克尔效应与旋转磁场结合(ROTMOKE)的实验方法^[3]。

纵向磁光克尔效应的克尔转角 θ_K 可表示为^[4,5]：

$$\theta_K(M) = \theta^{sat} m_1 + f m_1 m_t \quad (9)$$

其中 m_1 、 m_t 分别为归一化后的饱和磁化强度 M 在易轴和难轴的分量， θ^{sat} 对应于 $\alpha=0^\circ$ 时的克尔转角，等式右侧第二项为小量，可在后面的数据处理中消去，上式成为：

$$\theta_k(M) = \theta^{\text{sat}} m_1 \quad (10)$$

这样 φ 便可由 $m_1 = \cos\varphi$ 求得：

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{\theta_k}{\theta^{\text{sat}}} \quad (11)$$

用可旋转的外磁场代替 LMOKE 实验装置^[6]中固定的外磁场就得到了 ROTMOKE 实验装置，如图 2(b)。磁场由电磁铁产生，强度通过电流控制，借助步进电机实现 360° 旋转。实验使用的激光波长 670nm，入射角约 45° ，样品表面的光斑直径小于 0.2mm，这样通过水平和垂直移动样品，我们就可以对样品表面任意点进行测量。

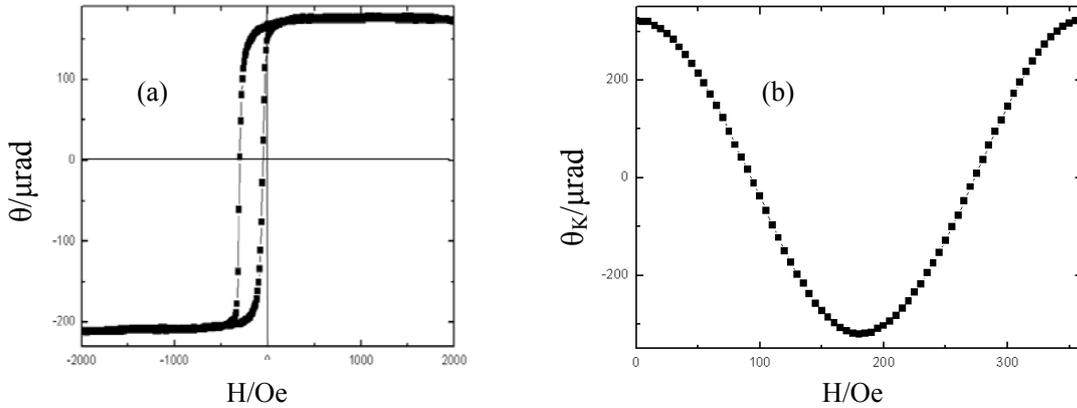


图 3 (a) 室温下 $H=2000 \text{ Oe}$, $t_{\text{AFM}}=19\text{\AA}$, $\alpha=0$ 处的磁滞回线, (b) $t_{\text{AFM}}=19\text{\AA}$ 处 θ_k 与 α 的关系

进行 LMOKE 测量时，首先调整磁场方向和激光入射面，使其保持水平，再将样品沿 IrMn 梯度方向水平放置，每隔 1mm 测量磁滞回线，如图 1，根据磁滞回线便可得到该位置的 H_E 和 H_C 。进行 ROTMOKE 测量时，磁场从 $\alpha=0$ 开始旋转，每 5° 测量磁滞回线，如图 3(a)，将磁滞回线上最大值与最小值相减就得到 θ_k ， θ_k 与 α 的关系曲线如图 3(b)， θ_k 的最大值即为 θ^{sat} 。由(11)式得到 φ ，(7)式得到 $l(\alpha)$ ，做出 $l(\alpha)$ 与 φ 的关系曲线并对(8)式进行拟合，这样就得到了样品某一点处的 H_{Ku} 和 H_{ex} ，如图 4。

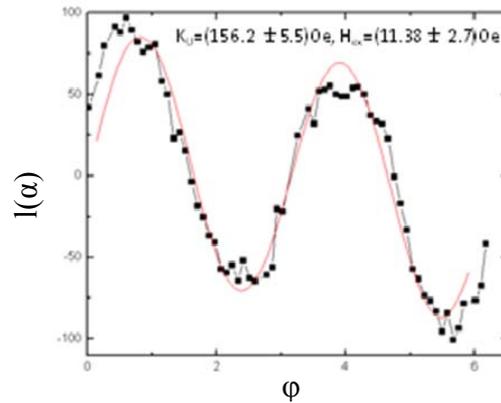


图 4 室温下， $H=2000 \text{ Oe}$, $t_{\text{AFM}}=7.3\text{\AA}$ 处 $l(\alpha)$ 随 φ 的变化及 $l(\alpha)$ 对 (7) 式的拟合曲线

3. 结果与讨论

首先，我们通过测量 $\alpha=0$ 时的纵向磁光克尔效应，在磁滞回线上得到 H_E 和 H_C 的数值，做出 H_E 和 H_C 与反铁磁层厚度(t_{AFM})的关系如图 5，外磁场 $H=2000 \text{ Oe}$ 。从图中可见 H_C 先随 t_{AFM} 的增大而增大，在 $t_{\text{AFM}}=8\text{\AA}$ 时达到最大值，之后逐渐减

小, H_E 在 $t_{AFM} < 8\text{\AA}$ 时约为零, $t_{AFM} = 8\text{\AA}$ 处绝对值迅速增大, 之后趋于饱和, 该结果与已得到的 $\text{Fe}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{FeMn}$ 双层膜结果类似^[7]。对于 H_E , 因为反铁磁层 T_N 随 t_{AFM} 增加而增加, 在 $t_{AFM} < 8\text{\AA}$ 时室温远大于 T_N , IrMn 层无反铁磁性, 因此 $H_E = 0$ 。随着 t_{AFM} 的增加, T_N 很快达到并超过了室温, IrMn 反铁磁性增强, 于是 H_E 绝对值增大, 当 $t_{AFM} > 15\text{\AA}$ 后, T_N 已远大于室温, 因此 H_E 呈现饱和状态。对于 H_C , t_{AFM} 较小时, FM/AFM 交换耦合作用随 t_{AFM} 增大而加强, 于是 H_C 随之增大, 在

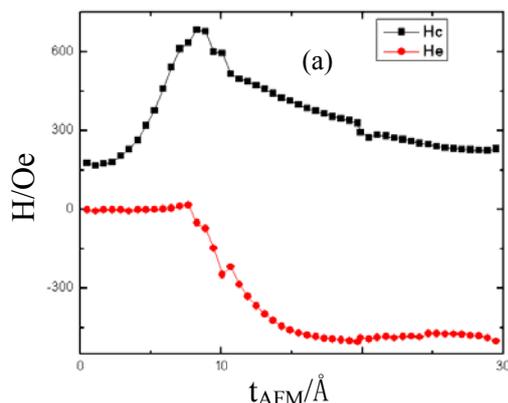


图 5 室温下 LMOKE 测得的 $\text{Co}(38\text{\AA})/\text{IrMn}(0-30\text{\AA})$ 样品 H_C 和 H_E 随 t_{AFM} 的变化

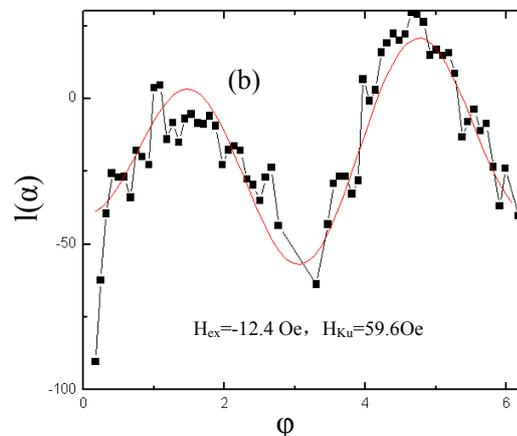
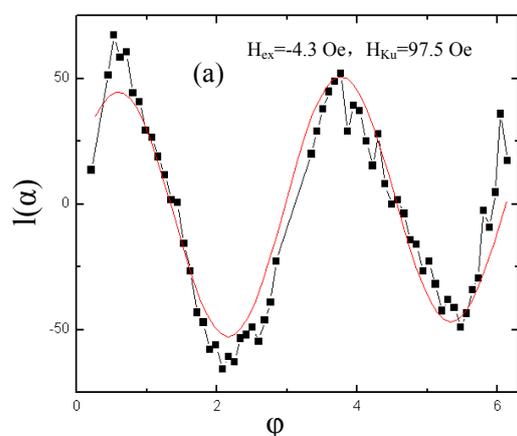


图 6 典型的 $I(\alpha)$ 与 ϕ 的关系曲线. (a) $t_{AFM} = 3.67\text{\AA}$, (b) $t_{AFM} = 27.5\text{\AA}$.

$t_{AFM} = 8\text{\AA}$ 时, T_N 等于室温, AFM 层磁矩混乱程度最大, H_C 达到极大值。

由 ROTMOKE 得到的典型 $I(\alpha)$ 曲线如图 6, 外磁场 $H = 2000\text{ Oe}$ 。对 (8) 式拟合得到各个未知量, 做出 H_{Ku} 和 H_{ex} 与 t_{AFM} 的关系曲线如图 7。从图中可得 $t_{AFM} = 7.3\text{\AA}$ 时 H_{Ku} 有最大值, 表明此时在 AFM 层影响下 FM 层有最强的单轴各向异性, 对比 LMOKE 得到的 $t_{AFM} = 8\text{\AA}$ 时 H_C 有最大值, 两者基本相符。然而 H_{ex} 与 H_E 不相符, H_{ex} 数值较小并且噪声较大, 可见 ROTMOKE 很难准确测量交换偏置各向异性常数, 我们认为出现这样结果的原因主要有两个。

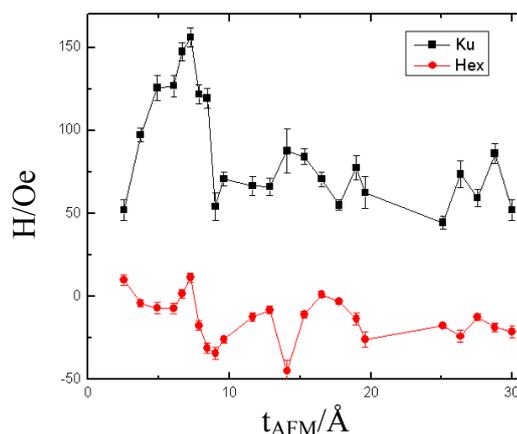


图 7 $H = 2000\text{ Oe}$, 通过 ROTMOKE 得到的 H_{Ku} 和 H_E 与 t_{AFM} 的关系曲线

首先, 实验原理中要求 Co 薄膜必须是单畴态, 而有可能实际情况是由于 IrMn 层表面磁矩比较混乱, Co 很难形成单畴结构。如果 Co 是单畴结构, $I(\alpha)$ 曲线应不依赖于外磁场的大小, 因此做出不同外磁场大小下 $I(\alpha)$ 随 ϕ 的变化曲线, 如图

8(a)(b)。可见 IrMn 厚度较小时不同外磁场下 $I(\alpha)$ 曲线重合，表明此时 Co 是单畴态，而 IrMn 厚度较大时 H 对 $I(\alpha)$ 影响很大， $I(\alpha)$ 的振幅和位相均随 H 变化，因此可认为此时 Co 是多畴态，虽然我们并未观察 Co 薄膜的磁畴形貌，但仍可判断其结构。

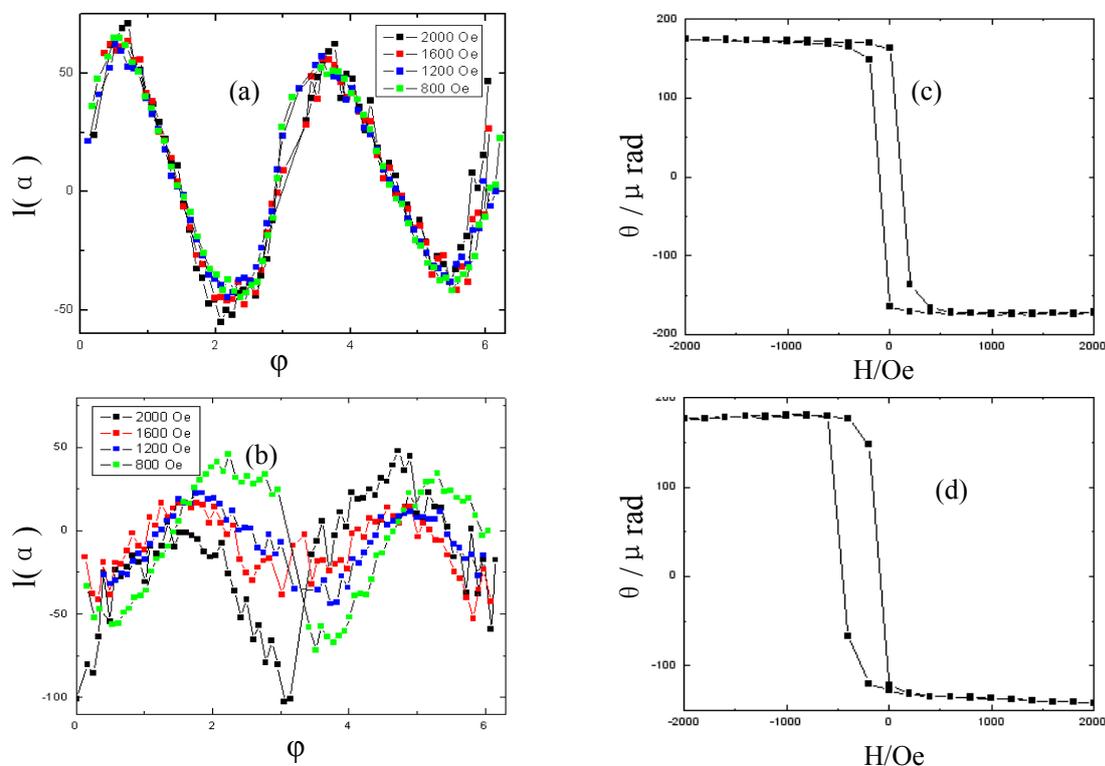


图 8 $I(\alpha)$ 随 ϕ 变化曲线：(a) $t_{AFM}=3.8\text{\AA}$ ，(b) $t_{AFM}=28.8\text{\AA}$ 。(c)(d) 分别是典型的磁滞回线。

其次，原理中要求的 Co 层易轴方向与交换偏置各向异性方向均固定，实际情况有可能不满足这一条件。经过进一步研究，我们认为 $I(\alpha)$ 曲线波谷的位置(即 x_0)代表了 Co 层易轴与水平方向的夹角，比较图 6(a)、(b) 可知 t_{AFM} 不同时 x_0 亦不相等，于是做出 x_0 与 t_{AFM} 的关系曲线如图 9，可见 $t_{AFM} < 7.8\text{\AA}$ 时 x_0 约为零，表明此时 IrMn 对 Co 无影响，这与已得到的 H_C 、 H_{Ku} 结果相符， t_{AFM} 增大后 x_0 迅速增加到 0.8(约 $\pi/4$) 附近，可认为此时 Co 的易轴方向发生了转动。另外，Gao 等^[8]在研究 FeNi/FeMn 双层膜交换偏置现象时发现 H_C 和 H_E 与外磁场方向的关系曲线同外磁场的旋转方式有关，原因是 AFM 层磁矩会跟随外磁场转动，使交换

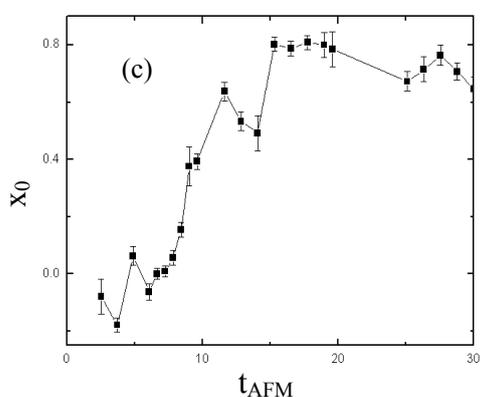


图 9 x_0 随 t_{AFM} 的变化曲线

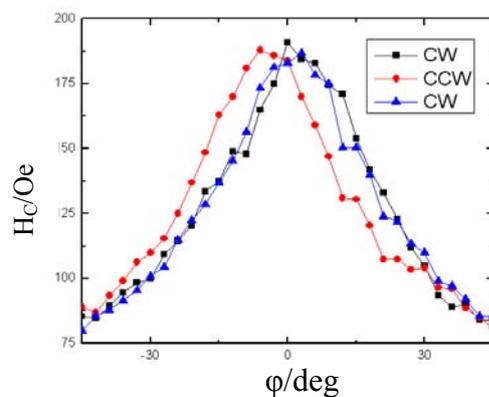


图 10 $t_{AFM}=17.8\text{\AA}$ 处 CW-CCW-CW 测量得到的 H_C 和 ϕ 的关系曲线。

偏置各向异性发生旋转。由于本实验模型中未考虑到交换偏置各向异性转动，所以有可能是这一原因造成了 H_E 难以准确测量。为验证这一假设，我们测量了外磁场顺时针(CW)和逆时针(CCW)旋转时 H_C 的变化，做出 H_C 与 α 的关系曲线，如图 10，可见 CW 与 CCW 曲线之间存在相位差，说明 AFM 层参与了磁化过程并存在磁滞现象，与 Gao 等^[8]的结果一致。

4. 结论

我们尝试了用 ROTMOKE 测量 FM/AFM 双层膜交换偏置各向异性常数，结果表明用这种方法很难准确得到 H_E ，我们认为主要原因是 Co 层的多畴态以及 Co 层易轴和交换偏置各向异性的转动使理论模型与实际情况不符。虽然 ROTMOKE 目前看来不能用于测量 Co/IrMn 双层膜的交换偏置各向异性常数，但由于这是一种方便快捷的研究磁性薄膜性质的方法，所以如何用 ROTMOKE 研究交换偏置现象仍是一个值得探索的问题。

参考文献

- [1] W.H. Meiklejohn, C.P. Bean, Phys. Rev. 102 (1956) 1413.
- [2] Daughton J M, Chen YJ . GMR materials for low2field applications[J] . IEEE Trans Magn , 1993 , 29 : 2705.
- [3] R. Mattheis, G. Quednau, J. Magn. Magn. Mater. 205 (1999) 143-150.
- [4] R. Mattheis, G. Quednau, Phys. Stat. Sol. (a) 172₂(1999)R7.
- [5] K. Postava, H. Jaffres, A. Schuhl, F. Nguyen Van Dau, M. Goiran, A.R. Fert, J. Magn. Magn. Mater. 172 (1997) 199.
- [6] Z. Q. Qiu, S. D. Bader, Rev. Sci. Instrum. 71, 1243(2000)
- [7] R. Jungblut, R. Coehoorn, M.T. Johnson, J. aan de Stegge, A. Reinders, J. Appl. Phys. 75 (1994) 6659.
- [8] T. R. Gao *et al.*, Phys. Rev. Lett. 99, 057201 (2007).