

# 磁光克尔效应

王艺霖\*

物理学院 学号:2200011456

**摘要:** 磁光克尔效应是指介质磁性引起的反射光偏振特性的改变. 本实验利用具有垂直磁各向异性的  $\text{Pt}_{73}\text{Co}_{27}$  合金薄膜样品进行实验, 并利用光弹调制技术对反射光的偏振态进行测量, 得到了克尔转角和克尔椭偏率与磁场的关系, 由此得到了克尔磁滞回线, 并测量了样品的饱和克尔转角与矫顽力. 同时, 通过多次改变起偏器夹角测量磁滞回线, 对于克尔转角与起偏器夹角的线性关系进行了验证.

**关键词:** 磁光克尔效应, 光弹调制, 克尔磁滞回线

## I. 引言

1877 年, 克尔 (J.Kerr) 发现平面偏振光从光洁磁极表面反射时, 偏振面会发生微小的偏转, 这种现象被称为克尔效应. 克尔效应与法拉第效应、塞曼效应同样, 都是由物质的磁化状态改变了其光学性质所引起的现象, 被统称为磁光效应 (magneto-optical effect).

借助磁光效应可以利用光学方法对物质的磁化状态进行探测, 或者相反, 在已知样品磁性质的时候测量其所处的磁场. 磁光效应在磁畴观察、磁光存储、薄膜磁性原位表征、自旋电子学、太阳磁场测量、原子操纵和冷却、光隔离等方面具有广泛的应用. 特别的, 由于磁光克尔效应观察的是样品表面的反射光, 不要求样品透明, 因此适用范围更加广泛.

本实验对入射线偏振光的极克尔效应进行了观察和测量, 并绘制了其克尔磁滞回线, 得到了样品的饱和克尔转角和矫顽力, 从而验证了克尔效应, 并加深了对磁光效应的物理本质、椭偏检测技术的理解.

---

\* e-mail: wylin@stu.pku.edu.cn; mobile number: 15837187296

## II. 理论

由经典电动力学中的介质极化和色散的振子模型可以解释介质的介电常数随外磁场的变化, 从而对克尔效应进行解释. 对于沿着磁场方向传播的圆偏振光, 有

$$n_{\pm} = 1 + \frac{Ne^2 / m\epsilon_0}{(\omega_0 \pm \omega_L)^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}, \quad \omega_L = \frac{e}{2m} B$$

其中+和-分别代表左旋和右旋圆偏振光. 磁场的存在导致样品的介电张量各向异性, 如果利用左旋和右旋圆偏振光为基, 那么介电常量张量将被对角化:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} n_+^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_-^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{bmatrix}$$

其中  $n_{\pm}^2 = n^2(1 \pm Q)$ ,  $Q$  为复磁光常量.

本实验中仅考虑极克尔效应, 此时磁场、入射光线均与样品表面垂直. 在这种情形下, 利用菲涅尔公式和上面所得到的折射率, 可以得到复克尔转角:

$$\tilde{\theta}_k = \theta_k + i\epsilon_k \approx -i \frac{nQ}{1-n^2}$$

其中  $\theta_k$  是克尔转角, 表示反射光偏振面相对入射光的转角;  $\epsilon_k$  是克尔椭偏率, 表征反射椭偏光的短轴与长轴之比.

克尔效应是非常微弱的效应, 克尔转角一般只有不到  $1^\circ$  的量级, 因此实验中使用了光弹调制技术对反射光进行调制, 并利用锁相放大器对调制后的信号进行测量. 计算表明, 当相位调制的振幅为  $\delta_0 = \delta_j = 2.405$  时, 克尔转角和克尔椭偏率可以表示为

$$\theta_k = \frac{\sqrt{2}V_{2\omega}}{4V_0J_2(\delta_{j_0})} \quad \epsilon_k = -\frac{\sqrt{2}V_{\omega}}{4V_0J_1\delta_{j_0}}$$

其中  $V_0$ 、 $V_{\omega}$  和  $V_{2\omega}$  分别为锁相放大后得到的直流分量、一次谐波分量和二次谐波分量.

## III. 实验

### A. 实验装置

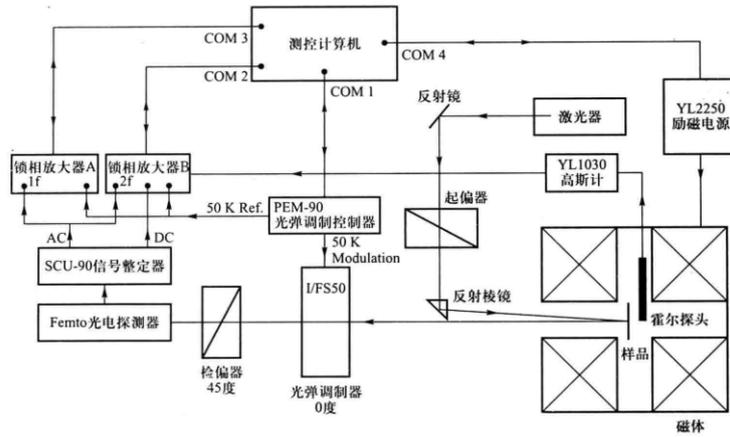


图 1 磁光克尔效应实验装置示意图

本实验实验装置如图 1 所示，激光器产生的激光经过起偏器后成为线偏振光，近似垂直入射到样品表面；出射光经过光弹调制后进入光电探测器，锁相放大器接收来自光电探测器的信号并将  $V_0$ 、 $V_\omega$  和  $V_{2\omega}$  传输给计算机。同时，计算机还会接收光弹调制控制器的调制频率  $\omega$  和样品处的磁感应强度  $B$ 。

## B. 实验内容

### 1. 实验装置的调节

将所有仪器启动，并检查仪器工作状态和接线情况。实验前需要将光弹调制器调节至其振动轴与起偏器平行，检偏器调节至与起偏器呈  $45^\circ$  夹角。这可以通过以下操作实现：首先将光弹调制器的振幅调零，调节检偏器使之达到消光状态；启动光弹调制器，调节其振动轴角度使得锁相放大器的输出最小；最后将检偏器转动  $45^\circ$ 。

### 2. 克尔转角的标度

由于锁相放大器对直流信号和交流信号的放大倍数不同，所以实际测量之前需要进行标定，克尔转角和克尔椭偏率的表达式需要引入一个标度系数  $\alpha$ ：

$$\theta_K = \alpha \frac{\sqrt{2}V_{2\omega}}{4V_0J_2(\delta_{J_0})} \quad \varepsilon_K = -\alpha \frac{\sqrt{2}V_\omega}{4V_0J_1\delta_{J_0}}$$

为了定出标度系数，将起偏器旋转  $\theta_0$ ，并测量  $V_0$  和  $V_{2\omega}$ 。对  $\frac{V_{2\omega}}{V_0} - \theta_0$  进行线性拟合，就可以

得到标度系数  $\alpha$ 。

### 3. 克尔磁滞回线测量

使用测控计算机上的测控程序，设定初始磁场、末态磁场、步长和采样时间、选择回线模式，输入标度系数 $\alpha$ ，系统将自动采集并显示数据曲线。

### 4. 克尔转角与起偏器角度的关系

改变起偏器角度多次测量，验证克尔转角与起偏器角度的线性关系。

## IV. 结果与讨论

### 1. 仪器调节

按上述方法对实验仪器进行调节，记录调节完毕时起偏器的刻度为 $340^{\circ}0'$ ，检偏器刻度为 $37^{\circ}50'$ ，光弹调制器振动轴刻度为 $288^{\circ}25'$ 。

### 2. 克尔转角的标度

利用测控计算机上的程序对标度系数进行了半自动的测量，得到的结果为

$$\alpha = -7.209490 \times 10^{-2} / ^{\circ}$$

### 3. 克尔磁滞回线测量

在实验中，采用起始磁场 $-1000\text{mT}$ ，末态磁场 $1000\text{mT}$ ，步长 $200\text{mT}$ （由于可能的仪器接线问题，使用 $50\text{mT}$ 的步长测量时测量值会发生漂移，因此本实验中仅采用较为粗糙的 $200\text{mT}$ 作为步长）。测量得到的结果如图 2 和图 3 所示，其中克尔转角磁滞回线已经将图线进行了平移。从图中可以看到克尔转角具有典型的磁滞回线特征，而克尔椭偏率则具有较大的偏差，这是因为克尔椭偏率取决于信号的一次谐波，而光线在样品中的反射、干涉等现象可能会对一次谐波分量造成影响。

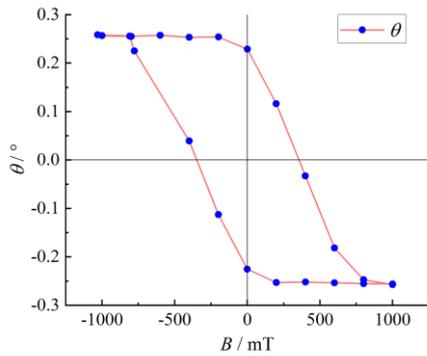


图 2 克尔转角磁滞回线

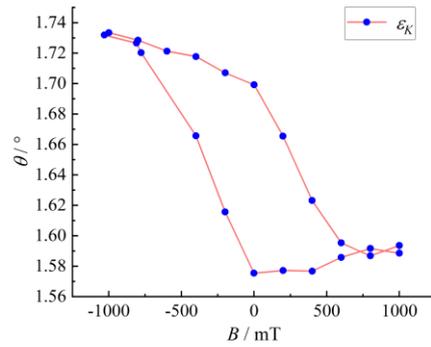


图 3 克尔椭圆率磁滞回线

对克尔转角的磁滞回线进行测量，可以得到饱和克尔转角为  $\theta_{max} \approx 0.256^\circ$ ，对数据进行线性内插后得到曲线的零点分别为  $-348.0\text{mT}$  和  $354.9\text{mT}$ ，平均之后给出样品的矫顽力为  $B_0 \approx 351.4\text{mT}$ 。

#### 4. 克尔转角与起偏器角度的关系

在实验中小范围内改变起偏器夹角  $\theta_0$ ，多次绘制克尔转角磁滞回线，得到的结果如图 4 所示，可以看到磁滞回线的形态几乎没有改变，而仅仅是发生了平移，平移的幅度也与起偏器夹角调节的幅度一致，这证明了测量的克尔转角与起偏器夹角之间的线性关系，也就是  $\theta_k = \theta_0 + \theta_{k0}$ ，其中  $\theta_k$  是测量得到的克尔转角， $\theta_{k0}$  是光线在样品表面反射时偏振面所发生的真实偏转，也就是起偏器夹角与光弹调制器振动轴夹角为 0 时的克尔转角。

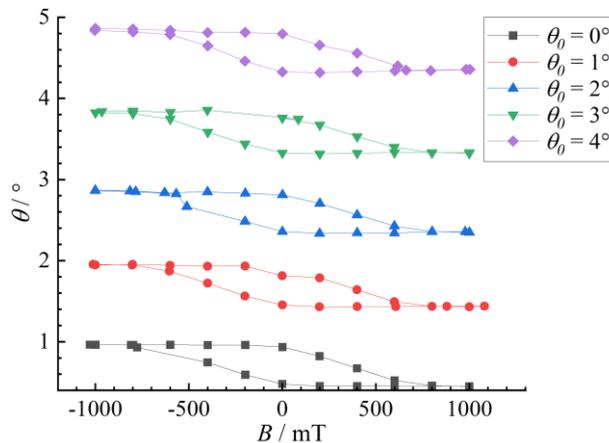


图 4 不同起偏器与光弹调制器夹角的克尔磁滞回线

## V. 结论

本实验使用具有垂直磁各向异性的 Pt73Co27 合金薄膜样品进行实验，并利用光弹调制技术对反射光的偏振态进行测量，得到了克尔转角和克尔椭圆率与磁场的关系，得到了克尔磁滞回线，验证了磁光克尔效应。同时，利用磁光克尔效应对样品的饱和克尔转角与矫顽力进行了测量。此外，通过多次改变起偏器夹角测量磁滞回线，对于克尔转角与起偏器夹角的线性关系进行了验证。

---

[1] 吴思诚，荀坤. 近代物理实验[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2015.

## 思考题

1. 我们的实验装置对克尔转角和克尔椭偏率的测量精度是否一样高，为什么？

不是一样高的，因为克尔椭偏率依赖于信号的一次谐波分量，而偏振光在样品内的反射、干涉等过程可能会对一次谐波分量产生较大的干扰，从而导致对克尔椭偏率的测量有着更大的误差。

2. 如果用一个以角速度  $\omega$  旋转的  $\frac{\lambda}{2}$  波片代替光弹调制器，光电探测器的输出信号会如何变化，是否也能测出复克尔转角？

波片的琼斯矩阵为：

$$\begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & -\cos 2\omega t \end{bmatrix}$$

因此可以得到反射光经过波片和检偏器后的光强为

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \left[ E_x^2 \cos^2 \left( 2\omega t - \frac{\pi}{4} \right) + E_y^2 \sin^2 \left( 2\omega t - \frac{\pi}{4} \right) + E_x E_y' \cos(4\omega t) \right] \\ &= \frac{1}{4} \left[ (E_x^2 + E_y^2) + (E_x^2 \sin 4\omega t - E_y^2 \sin 4\omega t + E_x E_y' \cos 4\omega t) \right] \end{aligned}$$

其中  $E_y'$  为  $E_y$  的实部。由此可见，出射光的强度包含直流分量和四次谐波分量，而四次谐波分量中同时包含了  $E_x^2$  和  $E_y^2$  的信息，因此这种方法并不能实现对复克尔转角的实部和虚部的有效提取，因此不能测出复克尔转角。