

磁光克尔效应

姓名*

北京大学物理学院 学号: 2x000xxxxx

(实验日期: 2025 年 5 月 15 日)

磁光克尔效应是指平面偏振光从光洁磁极表面反射时, 偏振面会发生微小偏转的现象, 在自旋电子学的科学研究和技术应用方面正起着越来越重要的作用. 本实验通过光弹调制技术和锁相放大技术, 利用 MOHyst 软件半自动化进行椭圆偏检测, 测量了一个铁磁样品薄膜 ($\text{Pt}_{73}\text{Co}_{27}$) 的克尔磁滞回线, 观察了磁光克尔效应. 测量得到样品的饱和克尔转角 $\theta_{Ks} = 0.255^\circ$ 及矫顽力 $B = 255.511 \text{ mT}$, 并探究了起偏器转角对于磁滞回线的影响. 让我们对磁光效应的物理起源、唯象理论和微观机理有了更好的理解, 并在同时学习了解椭圆偏检测技术.

关键词: 磁光克尔效应, 光弹调制, 锁相放大, 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, 偏振面会发生微小偏转 [1], 此即磁光克尔效应. 该效应连同法拉第效应、塞曼效应以及一系列反映了物质磁化状态对其光学性质影响的若干其他效应一起, 被统称为磁光效应. 借助磁光效应可以用光学方法探测物质的磁化状态. 或者, 在已知试样磁性质的情况下, 测量其所在处的磁场. 另外, 还可以通过施加不同的外磁场来改变物质对光场的响应行以达到某种应用目的. 因此, 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、光隔离等方面都有重要应用. 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, 其适用范围更宽. 早在 20 世纪 50 年代, 磁光克尔效应就被用于观察磁性样品的磁畴结构, 后来又以磁光克尔效应为基础发展出了磁光存储技术. 近年来, 克尔效应更被用于超薄磁性膜、磁化动态过程和自旋霍尔效应研究. 作为一种将物质磁性 (电子自旋) 与光偏振联系在一起的效应, 磁光克尔效应在自旋电子学的科学研究和技术应用方面正起着越来越重要的作用 [2].

本实验中, 我们通过光弹调制技术和锁相放大技术, 利用 MOHyst 软件半自动化进行椭圆偏检测, 测量了一个铁磁样品薄膜 ($\text{Pt}_{73}\text{Co}_{27}$) 的克尔磁滞回线, 观察了磁光克尔效应, 测量了样品的饱和克尔转角和矫顽力, 并探究了起偏器转角对于磁滞回线的影响. 对磁光效应的物理起源、唯象理论和微观机理有了更好的理解, 并在同时学习了解椭圆偏检测技术.

* email@pku.edu.cn; (86)1*****

II. 理论

对于磁性物质，磁场导致了各向异性的介电张量 ϵ ，且其对应的本征态为左、右旋圆偏光。本实验仅考虑极入射极克尔效应，此时磁场、入射光线均垂直与样品表面，系统具有旋转对称性。据菲涅尔公式，此时反射率：

$$r_{\pm} = \frac{1 - n_{\pm}}{1 + n_{\pm}}, \quad (1)$$

n_{\pm} 分别为左、右旋圆偏光的折射率。若磁光常量 Q 不为零，入射的线偏光（左、右旋圆偏光的叠加态）反射后为主轴相对于入射光偏振面转过一个微小角度的椭圆偏光，一般用复克尔转角 $\tilde{\theta}_K$ 来描述这样一种偏振状态的改变：

$$\tan \tilde{\theta}_K = \frac{k}{r_F} = i \frac{r_+ - r_-}{r_+ + r_-}. \quad (2)$$

注意到 $\tilde{\theta}_K$ 一般很小，可得：

$$\tilde{\theta}_K = \theta_K + i\epsilon_K \approx \tan \tilde{\theta}_K = \frac{k}{r_F} = -i \frac{n_+ - n_-}{1 - n_+ n_-} \approx -i \frac{nQ}{1 - n^2}. \quad (3)$$

其中， θ_K 和 ϵ_K 分别为复克尔转角的实部和虚部。

入射线偏振光在样品表面反射并经过光弹调制器和检偏器后，电场矢量可以写为：

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_F & -k \\ k & r_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 r_F 表示反射光沿着入射光偏振方向（即 x 方向）的偏振分量， k 表示沿 y 方向的偏振分量。它们与复克尔转角之间的关系为： $\tan \tilde{\theta}_K = k/r_F$

光强为：

$$\begin{aligned} I(t) &\approx \frac{r_F^2 + k^2}{2} (1 + 2\theta_k \cos \delta - 2\epsilon_k \sin \delta) \\ &= \frac{r_F^2 + k^2}{2} [1 + 2\theta_k J_0(\delta_0) - 4\epsilon_k J_1(\delta_0) \sin \omega t + 4\theta_k J_2(\delta_0) \cos 2\omega t + \dots] \end{aligned} \quad (5)$$

当取 $\delta_0 = 2.405$ 时，锁相放大器测量到的直流分量和一、二次谐波分量振幅与克尔转角、克尔椭圆率之间有如下关系：

$$\theta_K = B \frac{\sqrt{2} V_{2\omega}}{4 V_0 J_2(\delta_0)} \quad (6)$$

和

$$\epsilon_K = -B \frac{\sqrt{2} V_{\omega}}{4 V_0 J_1(\delta_0)}, \quad (7)$$

其中 B 为标度系数，是由于整定器对交直流信号的放大倍数不同引入的。

III. 实验装置

本实验的实验装置如图 1 所示. 入射激光经过起偏器后得到线偏振光, 在反射棱镜上反射并近似垂直样品表面入射, 反射光以此经过光弹调制器、检偏器, 最终到达光电探测器转化为电信号. 光弹调制器可以使光的沿其振动轴方向的偏振分量相对于垂直于其振动轴方向的偏振分量有一附加相位差 $\delta = \delta_0 \sin \omega t$. 检偏器与光弹调制器的振动轴成 45° 角. 光信号转化为电信号后, 输入到信号整定器将直流、交流信号分离, 并由锁相放大器 A、B 分别测量一次谐波分量、直流分量和二次谐波分量. 磁场由励磁电流产生, 并被特斯拉计探测. 锁相放大器、光弹调制控制器和励磁电源均由测控计算机控制.

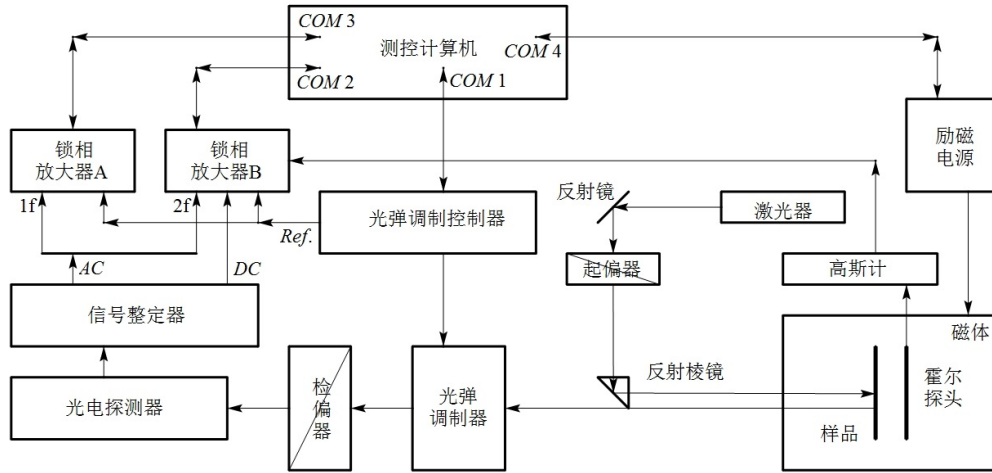


图 1. 实验装置示意图

在实验过程中, 我们首先设定了各个实验仪器的初始参量, 并调节光路和样品至合适的位置. 然后调节起偏器、光弹调制器和检偏器, 使得后两者与起偏器夹角分别为 0° 和 45° . 调整好后, 再利用软件进行半自动定标, 求得标度系数 $B = 6.53754321058199 \times 10^{-2^\circ}$, 并将其输入到软件中, 选择合适的参数后, 即可使用软件自动采集数据绘制样品的磁光克尔磁滞回线, 测量了样品的饱和克尔转角和矫顽力. 最后可以通过手动旋转起偏器的角度, 探究起偏器转角对于磁滞回线的影响.

IV. 结果与讨论

图 2 和 图 3 分别给出了克尔转角和克尔椭圆率随磁场变化的关系, 磁场变化范围为 $-1\text{ T} - +1\text{ T}$, 步长 100 mT . 从 图 2 可以看出, 克尔转角随磁场变化的关系出现了明显的磁滞现象, 这表明样品具有铁磁性; 而 图 3 所显示的克尔椭圆率随磁场的变化并无规律可言. 这可能是由于激光在光弹调制晶体的两个表面发生多次折射、反射, 产生多光束干涉现象, 进而影响一次谐波 V_ω 的测量. 因此, 后续实验中将不再关注克尔椭圆率.

当磁场强度达到一定程度时, 克尔转角趋于定值. 饱和克尔转角可以通过将这两个定值做差并除以二得到. 从 图 2 中可以得到饱和克尔转角 $\theta_{Ks} = 0.255^\circ$. 通过对于

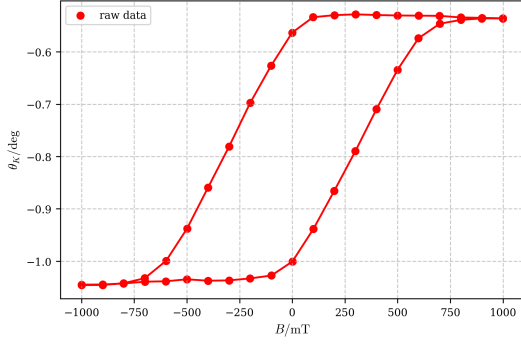


图 2. 克尔转角随磁场的变化

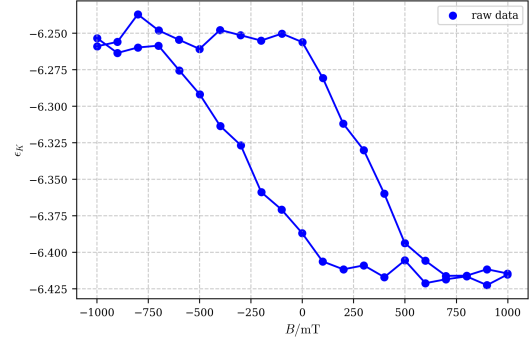


图 3. 克尔椭圆率随磁场的变化

非饱和区的磁滞回线进行线性拟合近似，得到曲线“零点”处两个方向上磁场的平均值——矫顽力约为 $B = (296.614 + 214.408)/2 = 255.511 \text{ mT}$ ，可见曲线并非十分对称，这可能源自测量误差或涨落。

小角度改变起偏器的转角，相当于将入射样品表面的线偏振光的偏振方向转过一个小角度，进而偏振方向与出射的椭圆偏振光长轴方向的夹角会增加相同的角度，于是可以利用线性回归求出标定系数 B 。在更大的范围内改变起偏器转角，既可以分析前述的求标定系数 B 的方法的精确度，也可以进一步探究起偏器转角对于磁滞回线形状、位置等因素的影响，以及小角度近似的适用范围。具体来说，在实验中分别转动起偏器 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ ，并绘制克尔转角的磁滞回线，见图 4。

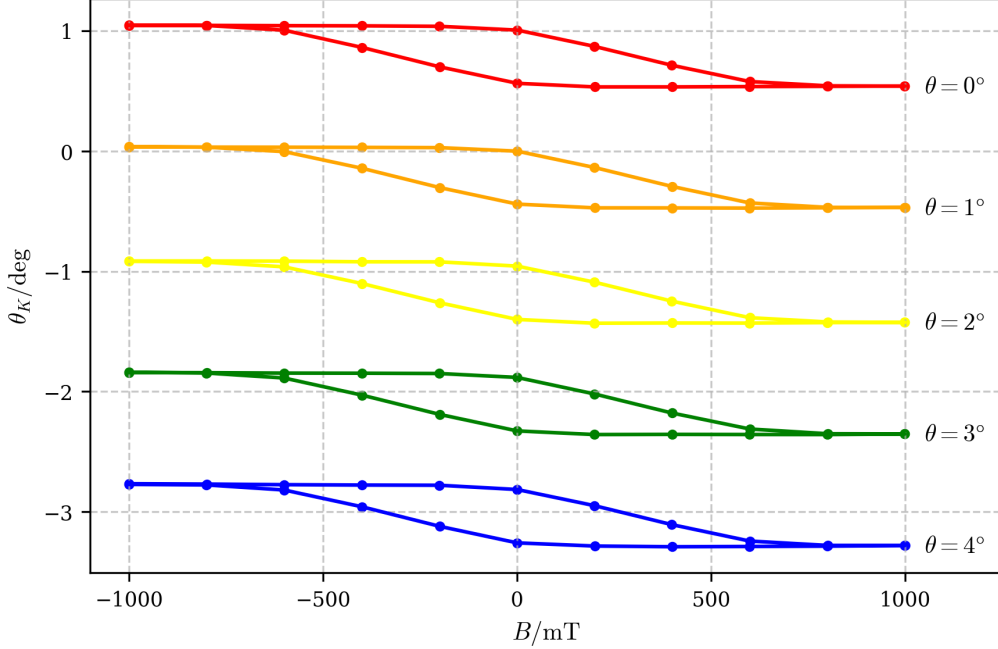


图 4. 改变起偏器转角测得的磁滞回线

从图 4 中可以直观地看出，各条曲线磁滞回线的形态无显著变化，相互之间近似为上下平移的关系，取每条曲线中心对应的克尔转角为 θ_0 ，可以看出 θ_0 位置随 θ 近似线性地平移，与我们的认识基本吻合。

V. 结论

本实验通过椭偏检测技术, 半自动化测量了一个铁磁样品薄膜 ($\text{Pt}_{73}\text{Co}_{27}$) 的克尔磁滞回线, 观察了磁光克尔效应, 测量得到样品的饱和克尔转角 $\theta_{Ks} = 0.255^\circ$ 及矫顽力 $B = 255.511 \text{ mT}$; 并探究了起偏器转角对于磁滞回线的影响, 验证了在小角度转动时, 转角对于克尔转角的近似线性影响. 使我们对磁光效应的物理起源、唯象理论和微观机理有了更好的理解, 并在同时学习了解椭偏检测技术. 但是由于时间有限, 本报告并未能对实验现象做出更加定量的分析. 将来的实验还可以通过改变激光的波长等方式对实验现象进行进一步的分析讨论.

致谢

感谢陈纭帆同学协力完成了本实验, 感谢周路群老师在实验中的讲解和指导.

-
- [1] J. Kerr, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science **3**, 321 (1877).
 - [2] 吴思诚, 荀坤, 近代物理实验, 4th ed. (高等教育出版社, 北京, 2015).

附录 A: 思考题

1. 我们的实验装置对克尔转角和克尔椭圆率的测量精度是否一样高？为什么？

不一样高。克尔转角正比于二次谐波分量，克尔椭圆率正比于一次谐波分量。因为光束在正入射的情况下，会在光弹调制晶体的两个表面发生多次折射、反射，产生多光束干涉现象，影响一次谐波的测量，进而导致对克尔椭圆率的测量是不准确的。

2. 如果用一个以角速度 ω 旋转的 $\lambda/2$ 玻片代替光弹调制器，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？

以角速度 ω 转动的 $\lambda/2$ 玻片，其琼斯矩阵为：

$$\begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & -\cos 2\omega t \end{bmatrix}.$$

光强为：

$$I(t) = \frac{1}{2} (|E_x|^2 + |E_y|^2) + \frac{1}{2} \sin 4\omega t (|E_x|^2 - |E_y|^2).$$

由于 $E_y/E_x = \tilde{\theta}_K$ ，因此可以测出复克尔转角的模，但是相位信息无法得出，所以利用这种方法不能测出复克尔转角。