

磁光克尔效应 实验报告

作者

摘要：本次实验通过光弹调制器（PEM）系统研究了磁光克尔效应，重点测量了极克尔效应下的克尔转角（ θ_K ）和克尔椭圆率（ e_K ）。实验首先校准了偏振器件主轴，并利用起偏器转角进行标定，验证了克尔转角与起偏器转角的线性关系。通过测量不同磁场下的滞回曲线，获得了克尔转角和椭圆率的饱和值及矫顽力，并分析了反射三棱镜带来的额外椭圆率影响。实验结果表明，克尔系数实部对应转角，虚部对应椭圆率，数据与理论模型一致，证实了弱克尔效应近似下的有效性。本研究为磁性材料表征提供了可靠实验方法。

关键词：磁光克尔效应；光弹调制器；克尔系数；磁滞回线；偏振调制

I. 引言

磁光克尔效应是磁性材料在外磁场作用下反射光偏振态变化的现象，自 1877 年 Kerr 首次报道以来，已成为研究磁有序材料的重要手段。本实验旨在通过光弹调制器系统精确测量极克尔效应，避免反射角带来的干扰。实验原理基于琼斯矩阵理论，推导了克尔系数与反射相移的关系，并分析了光弹调制器对偏振光的调制机制。实验内容涉及偏振器件校准、滞回线测量及误差分析，重点探讨了入射椭圆率对结果的影响。通过定量处理数据，本实验验证了理论预测，并为磁性材料光学性质研究提供了实验依据。

II. 实验原理

本部分的公式推导详见附件markdown文件。

1、克尔效应及其本征偏振态

各种理论模型指出，克尔效应对应的反射相移本征态应该是左右旋圆偏振态，在琼斯矢量线偏振基矢上的表示为

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}$$

本实验主要研究极克尔效应，因此反射角带来的额外效应（相位和p或s偏振的反射

率不同）可以忽略；同时克尔效应较弱（如果不提及，后文中默认使用弱克尔效应近似）。克尔系数 Q_K 和本征偏振反射率 r_{\pm} 关系如下：

$$\frac{r_-}{r_+} = 1 + i\epsilon, Q_K = -\frac{i\epsilon}{2 + \epsilon} \approx -\frac{i\epsilon}{2}$$

在线偏振光入射时， $\text{Re } Q_K$ 对应克尔转角 θ_K ， $\text{Im } Q_K$ 对应克尔椭偏率 e_K ，而这些系数均是实验测量的。

2、光弹调制器对任意偏振态光的调制

对于任意椭圆偏振光，琼斯矢量表示为

$$E = E_0 \begin{pmatrix} \cos \theta \\ e^{i\phi} \sin \theta \end{pmatrix}$$

而光弹调制器具有时变的快慢轴相对延迟，不妨记为 $\delta(t) = \delta_0 e^{i\omega t}$ 。对应琼斯矩阵

$$T = \begin{pmatrix} 1 & \\ & e^{-i\delta(t)} \end{pmatrix}$$

出射光强的公式在指数上面有震荡，因此会产生不同频率成分的光。经过推导，光矢量分量

$$E_y = E_{y0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\delta_0) e^{-in\omega t}$$

在弱克尔效应极限，使用线偏振光入射样本，经过 45° 验偏器后测量得到的光强

$$I(t) = \frac{I_0}{4} \left[1 + 2 \cos \alpha \sin \alpha \cos \phi \left(J_0(\delta_0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\delta_0) \cos(2n\omega t) \right) + 2 \cos \alpha \sin \alpha \sin \phi \left(2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\delta_0) \sin[(2n+1)\omega t] \right) \right]$$

显然，此处 α 调控了克尔转角，而 ϕ 调控了克尔椭偏率。整理后得到频率成分和上述两测量量的关系为

$$\begin{cases} \theta_K = \frac{I_{2\omega}/I_0}{2\sqrt{2}J_2(\delta_0)} \\ e_K = \frac{I_{\omega}/I_0}{2\sqrt{2}J_1(\delta_0)} \end{cases}$$

为保证直流成分稳定，通常取 $J_0(\delta_0) = 0$ 或 $\delta_0 \approx 2.405$ ，这样直流成分可以直接代替 I_0 的地位。实际实验中，可以通过调节 δ_0 来测量得到不同的频率成分值。

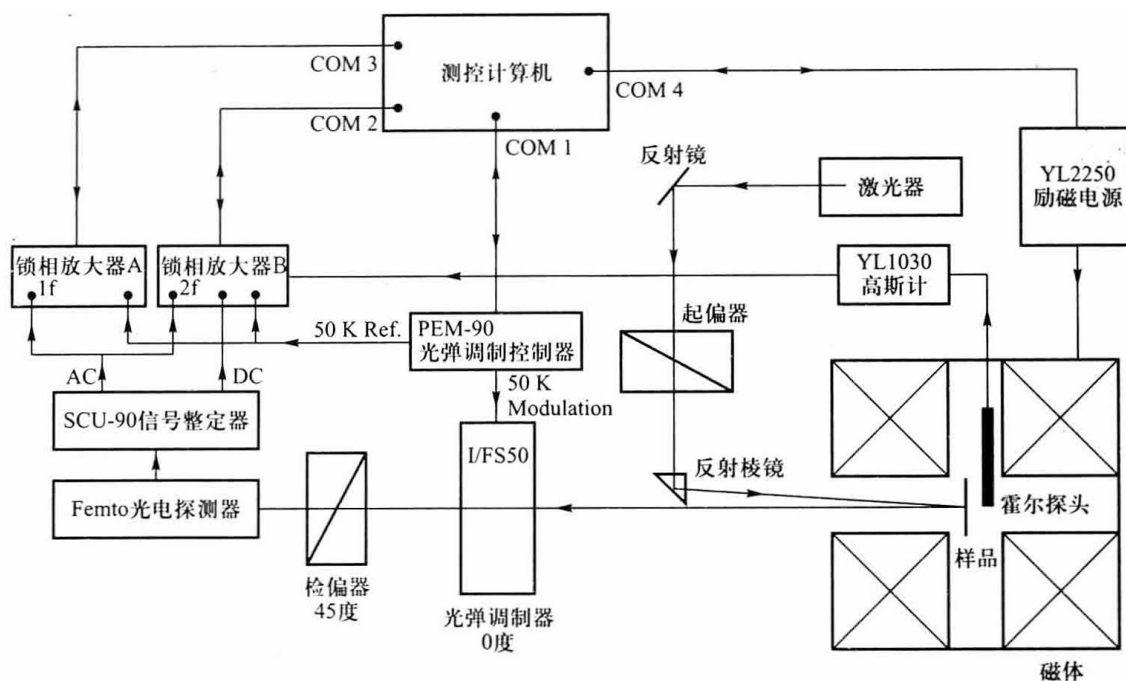
3、椭圆偏光入射对系统的影响

假设在入射到光弹调制器-验偏器系统前，系统的偏振态已经是具有一小椭圆率 e 的状态，会对光弹调制器为基础的成分分析产生一定的影响。对应现实中的试验系统，这部分额外椭圆率很可能是反射三棱镜带来的额外误差。理论分析（详见附件）指出，相对误差

$$\begin{cases} \frac{\Delta I_\omega}{I_\omega} = -\frac{e}{e_K} \\ \frac{\Delta I_{2\omega}}{I_{2\omega}} = -e^2 \end{cases}$$

需要注意的是，反射三棱镜带来的额外误差不仅会带来额外的椭圆率，也会对转角产生一定的影响。本实验中起偏器入射光非常接近s偏振态，因此这些效应的影响都不显著。

4、实验设备



图II.4.1. 实验光路图

按光路顺序介绍器件及其功能：

第一个反射镜是镀银反射镜，可以视为理想反射镜；同时此时的激光是普通的自然偏振激光，经过起偏器后才会带有偏振性质。

光线经过反射棱镜后照射到样品表面；反射棱镜可能带来的效应在后文中有介绍。

样品为Pt-Co合金，成分为 $\text{Pt}_{73}\text{Co}_{27}$ ，其典型极克尔旋转角饱和值~零点几度。反射后，不再经过棱镜，直接照射到检验系统，因此实验和最理想的极克尔效应情形（正入射）存在一定差异。

随后光线经过光弹调制器，调制器的工作原理是通过对一玻璃施加横向应力使得其折射率对于不同偏振态产生差异，从而产生相位延迟 δ 。光弹调制器和后面的 45° 验偏器组成的检验系统，其具体工作原理详见附件理论推导的md文件。

经过光学系统后，通过光电探测器转换为电信号，并经过整定器隔离并滤波、放大后进入锁相放大器测量。需要测量的信号及其处理方式详见附件。

III. 实验内容

1、偏振器件主轴的确定及定标

光弹调制器无相差，方便利用起偏器和验偏器的消光现象定出相对轴位置。

接下来置位起偏器和验偏器平行位置，打开光弹调制器，无相差相关现象则说明光弹调制器主轴已对齐。此时设置好验偏器 45° 转角，即光路的偏振设定完成。

上述调节均未考虑到与反射三棱镜的s偏振对齐，因此会产生额外的效应；后续会简要分析。

根据理论式

$$\begin{cases} \theta_K = \frac{I_{2\omega}/I_0}{2\sqrt{2}J_2(\delta_0)} \\ e_K = \frac{I_\omega/I_0}{2\sqrt{2}J_1(\delta_0)} \end{cases}$$

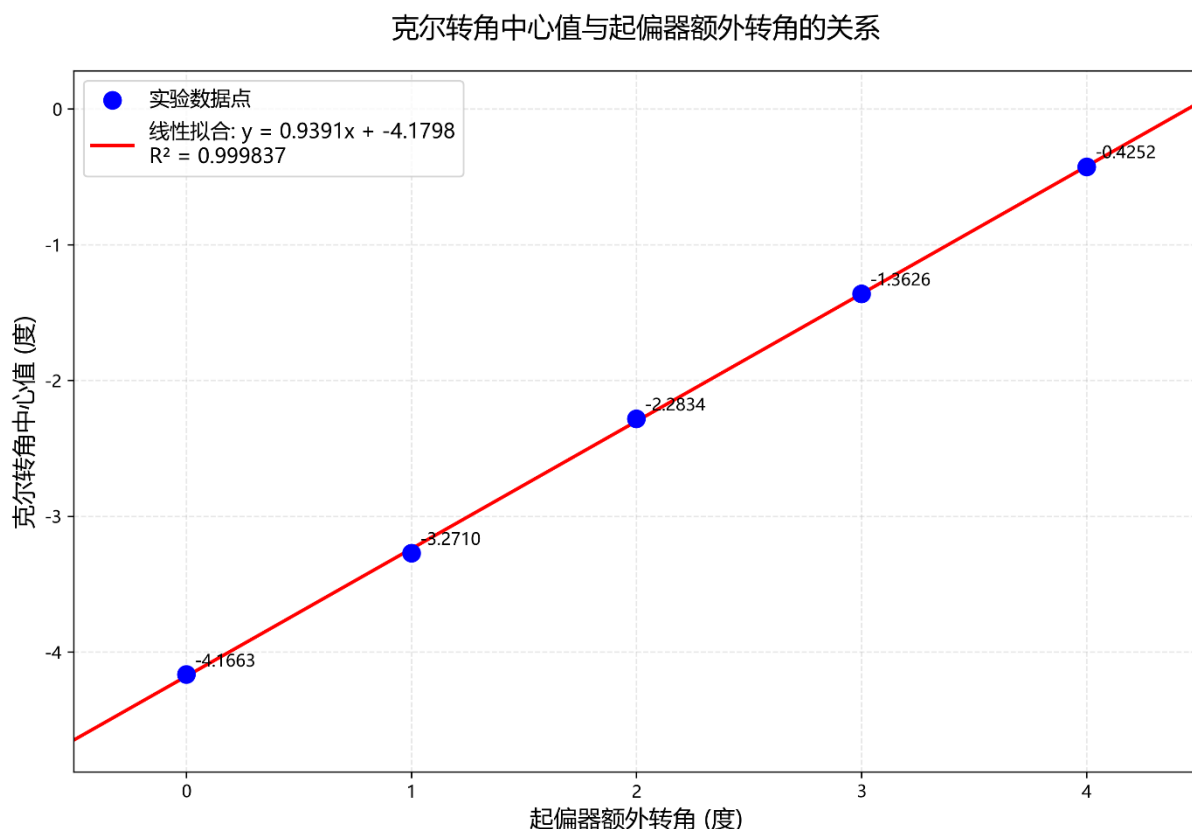
然而各个频率成分信号经过放大，无法直接使用，因此实验开始前需要对信号定标。注意到极克尔效应是旋转对称的，因此直接旋转起偏器相当于旋转产生反射克尔光的整个部分，则该转角会直接附加在 θ_K 上，因此可用于很好地定标。

实验程序的后面部分已使用定标结果，此处仅展示。实验程序使用的定标系数 $5.775738\text{E-}02$ 度/信号单位；拟合得到的定标系数 $5.767563\text{E-}02$ 度/信号单位。

2、滞回线的测量

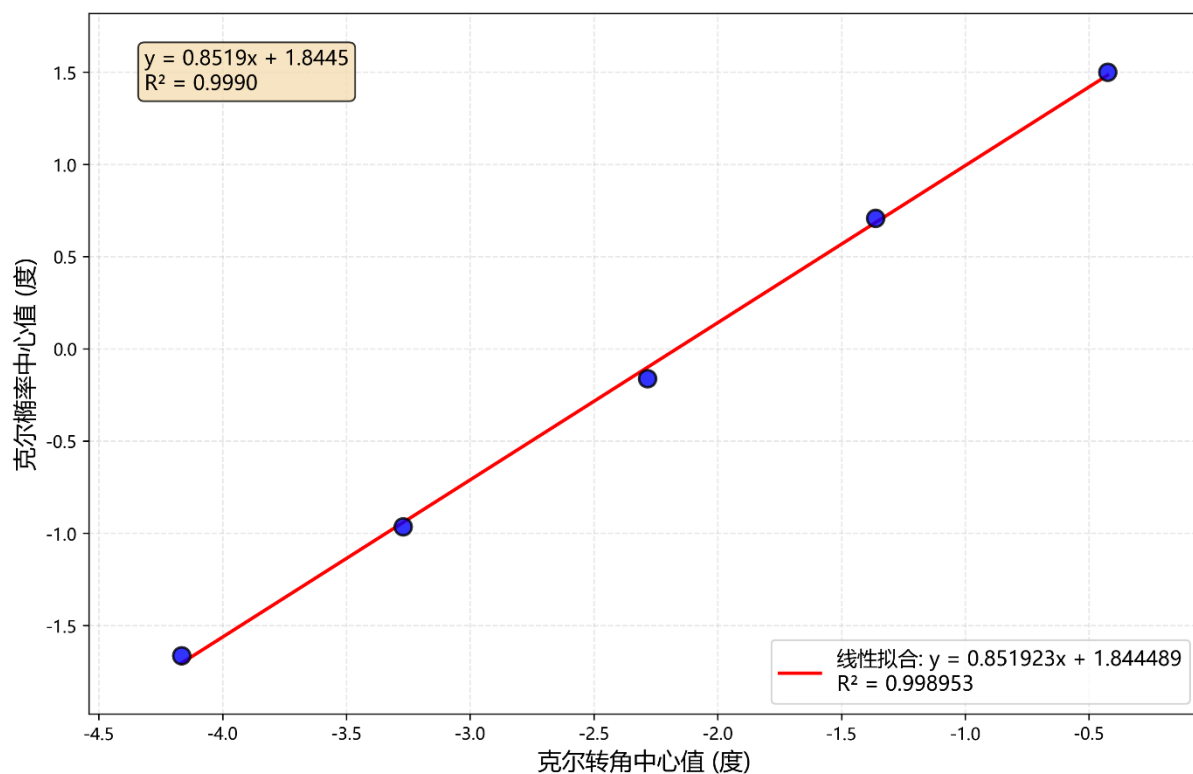
滞回线在不同起偏器转角下，同样能验证刚才的标度关系。在滞回线测量中，认为若能找到滞回线的对称中心，则该中心的位置就应该是无任何磁化时的信号位置，即测量到了排除克尔效应时的、由起偏器和反射镜带来的额外转角和椭偏率。

下图验证了1、中关于“起偏器转角直接和 θ_K 相加”的结论；斜率不为1可能是由于定标不准确（如果使用拟合定标系数，表现更好；但仍不是严格的1），或可能的正弦函数非线性造成的。



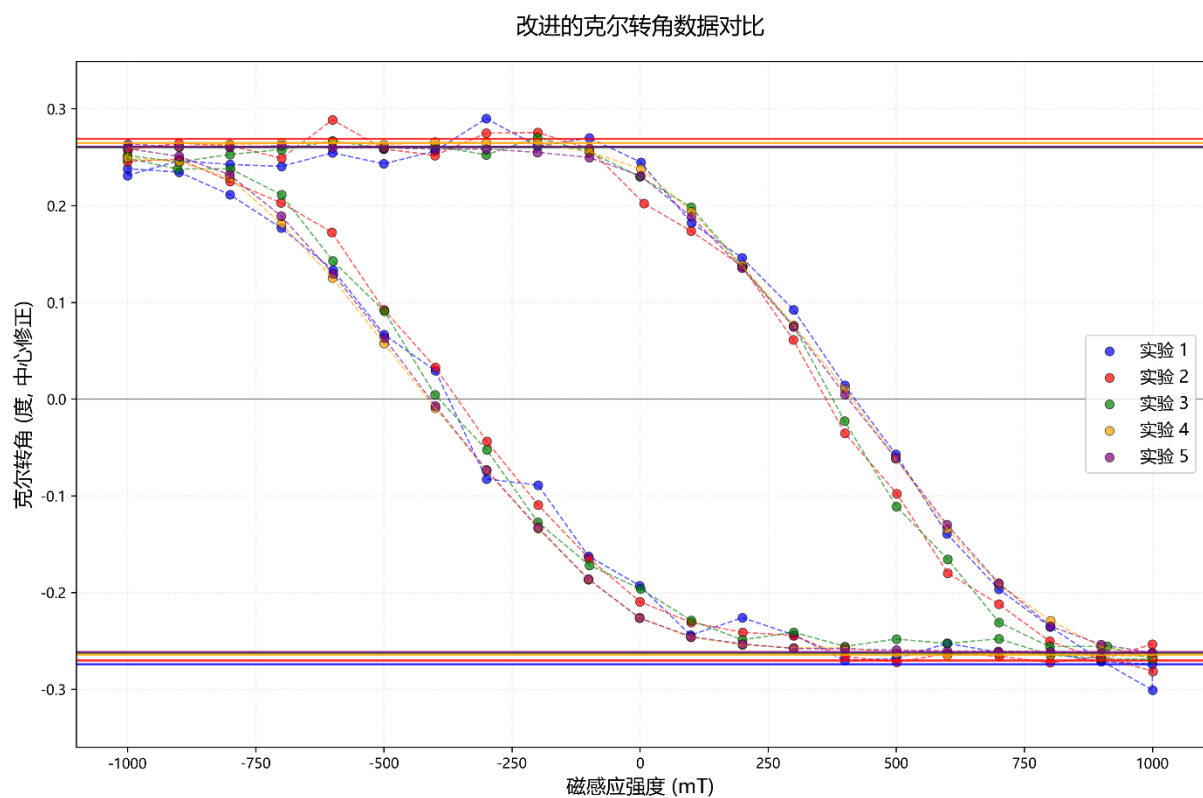
同时我们还发现，克尔椭偏率和克尔转角测量值（也就反映了起偏器转角）也有类似的线性关系，验证了反射三棱镜会带来额外的椭偏率的结论。

克尔转角与克尔椭率中心值关系图（实验4、5椭率中心值取负）

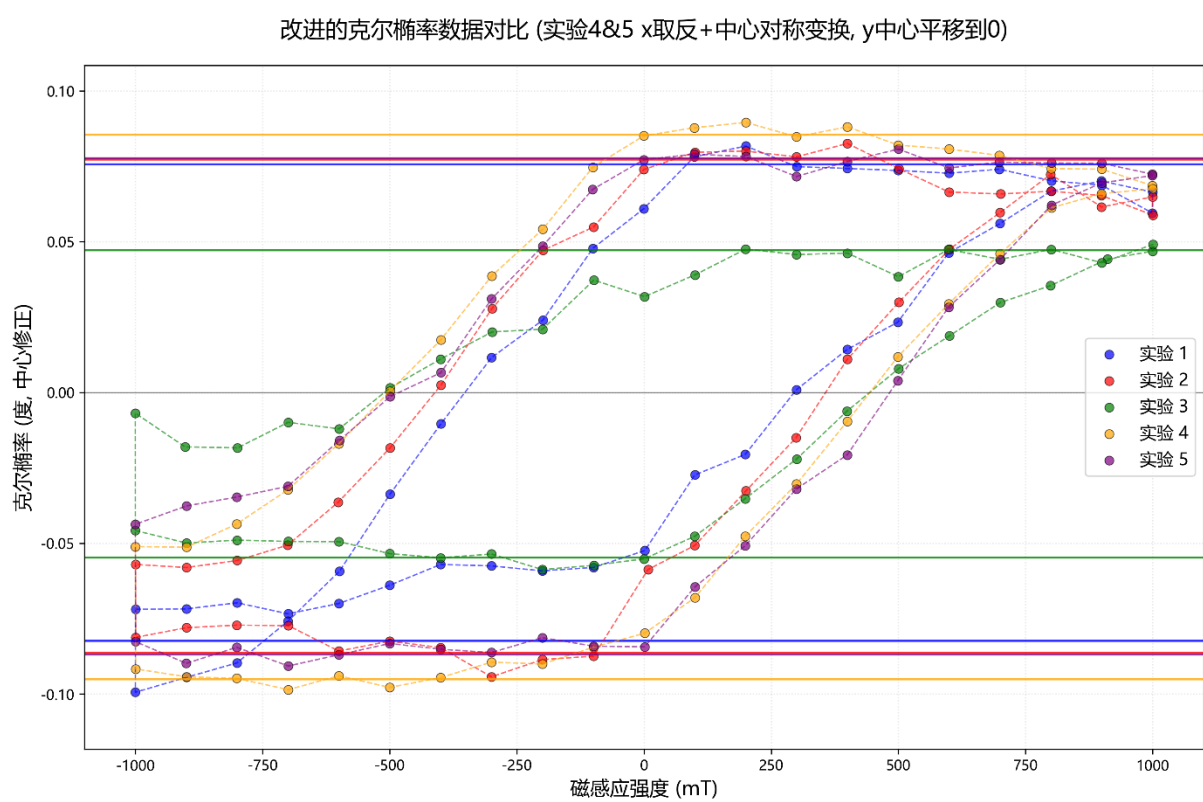


图III.2.2. 克尔椭偏率随克尔转角变化关系；信号处理带来的额外反号问题已经被修正

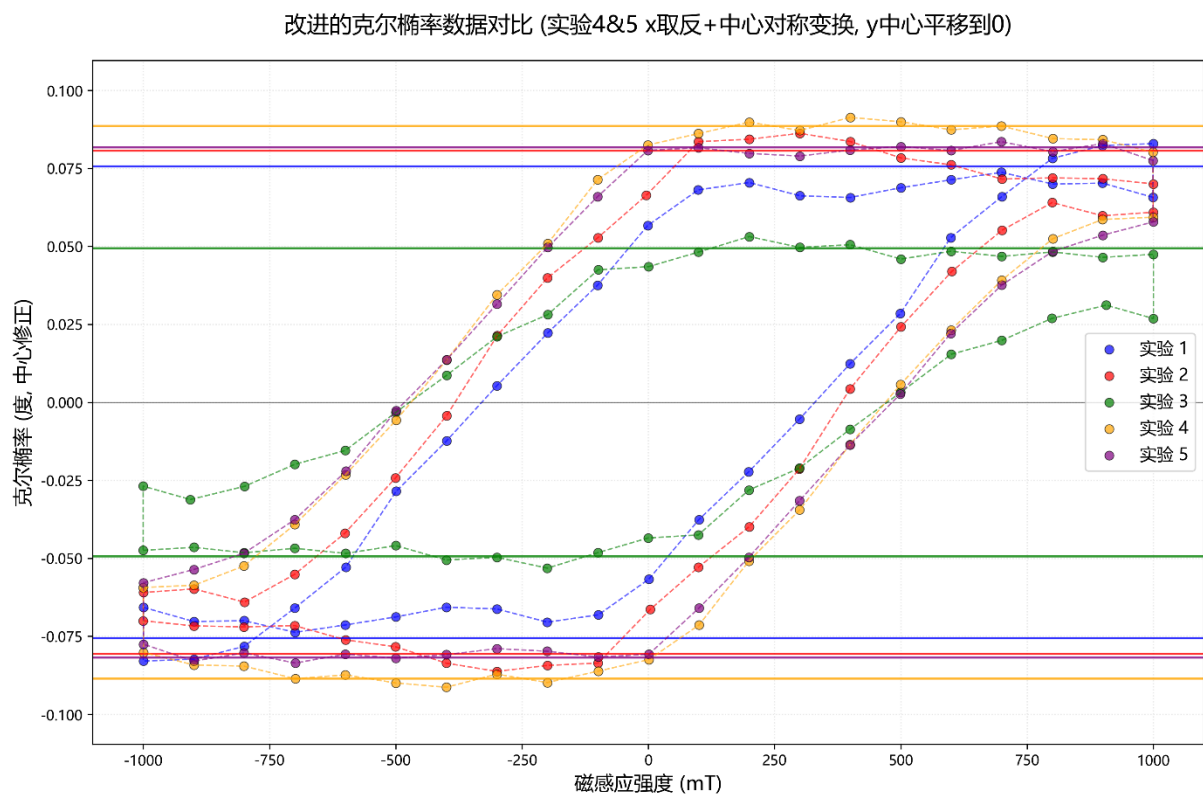
依据理论分析，所有的额外中心值都可以直接在数值运算上直接减去（如果仅考虑一阶修正），因此进行数据平移后，得出多次实验的滞回曲线。图中的横线标记了饱和强度。克尔椭偏率图在1T磁场下可能存在起始磁化完全饱和问题；限于实验条件未进一步改进磁化过程。观察到磁场反向变化之前已基本完成饱和，因此正确的数据处理方式是将右下半条滞回曲线作为正确的滞回线进行处理；本报告采取没那么严谨的双侧平均作为处理依据，基本能够得出数值上大致正确的结论。



图III.2.3. 克尔转角的滞回线



图III.2.4. 克尔椭圆率的滞回线；信号处理带来的额外反号问题已经被修正



图III.2.4. 克尔椭偏率的滞回线（已对称化处理）；信号处理带来的额外反号问题已经被修正

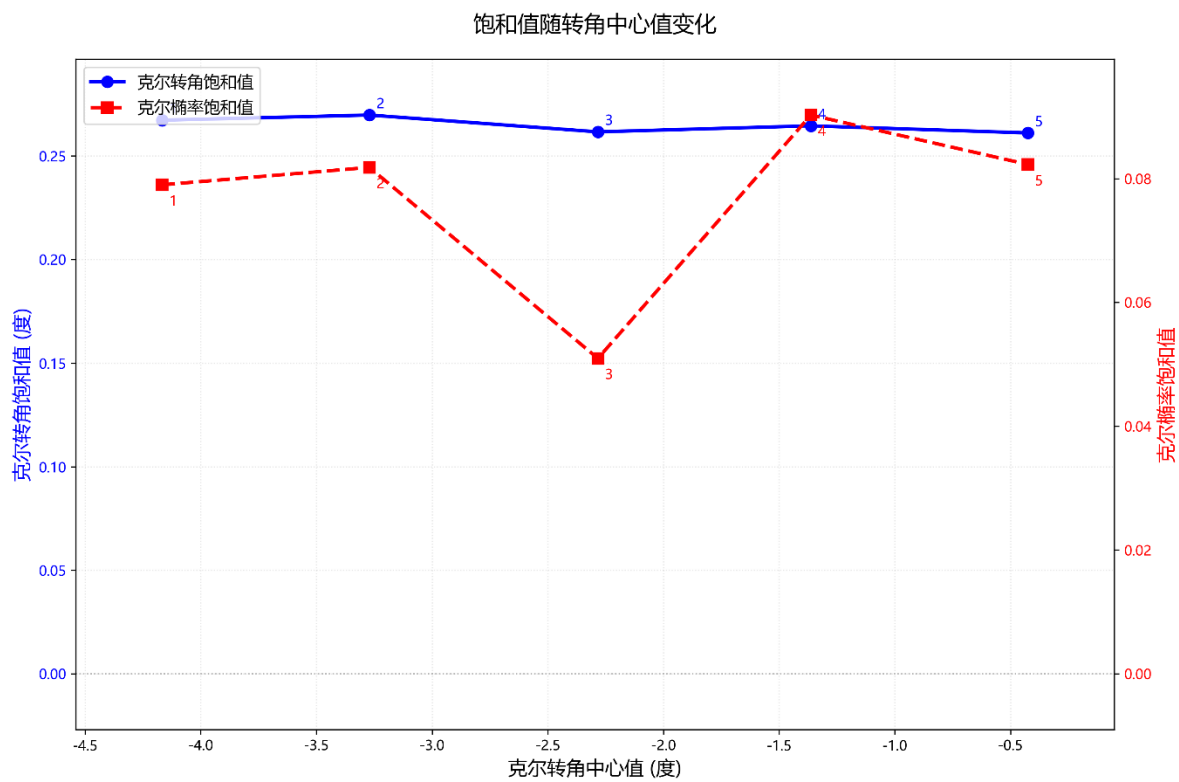
经过数据处理，得到滞回线性质

序号	转角矫顽力/deg·mT	转角饱和值/deg	椭率矫顽力/mT	椭率饱和值
1	404.0709	0.267267	-83.4102	0.075602
2	381.0533	0.26974	-128.688	0.080588
3	379.8125	0.261623	-98.9075	0.049365
4	428.0364	0.264538	-174.489	0.088605
5	416.6704	0.261102	-163.407	0.081774
均值	401.9287	0.264854	-129.781	0.075187
标准差	21.38007	0.003685	39.47842	0.015162

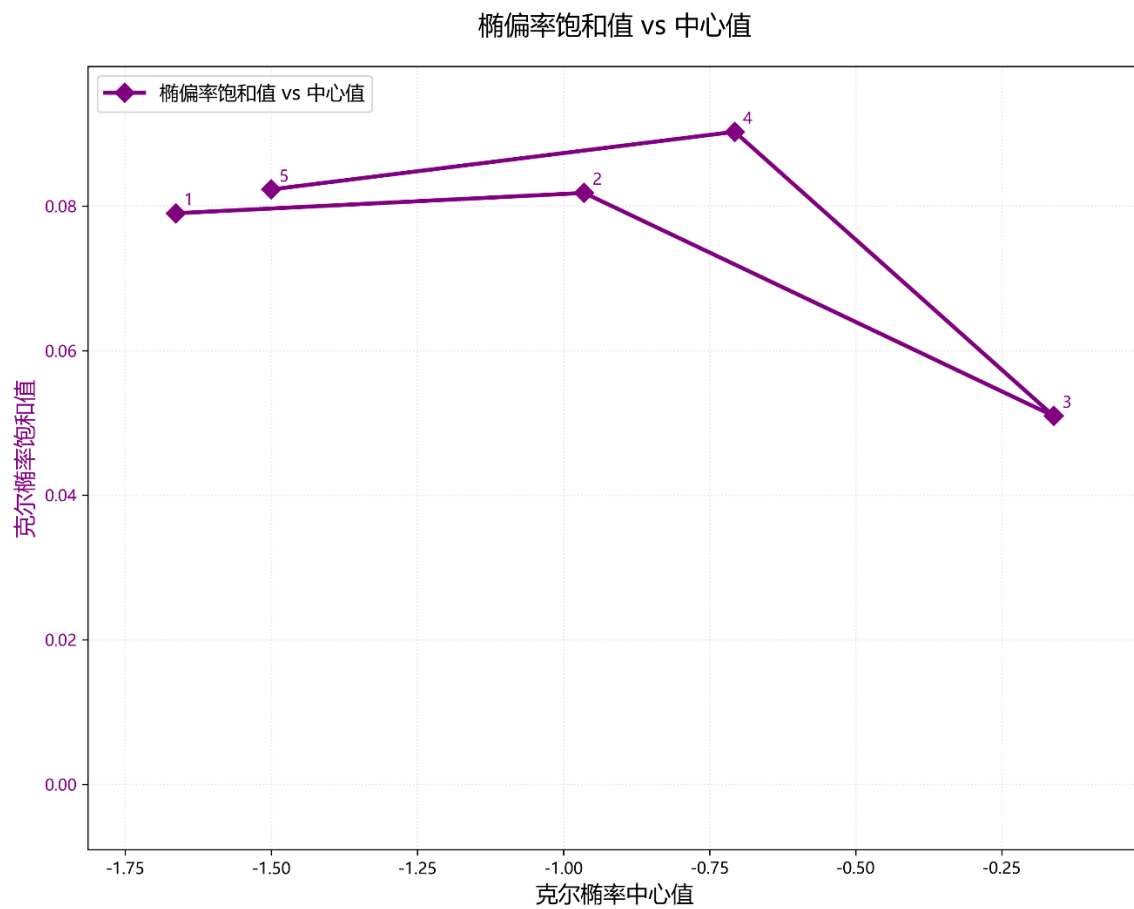
表III.2.1. 多次实验滞回线相关性质

克尔转角（需要 $\times \frac{\pi}{180}$ ）就是克尔系数的实部，克尔椭偏率就是克尔系数的虚部。

通过对比不同入射角下椭偏率中心值和椭偏率数据，可以看见入射椭偏率的影响；由于实验条件未能测量多个数据，同时也有棱镜角等复杂因素印象，因此反射理论预言的椭偏率线性变化关系没有得到验证；然而理论的确成功预言了如果入射光已经有椭偏率，会使得克尔反射光椭偏率增大的定性现象。



图III.2.5. 不同入射转角下的克尔系数



图III.2.6. 克尔椭圆率随入射椭圆率变化关系

IV. 结论

本实验成功利用光弹调制器 (PEM) 系统实现了对磁光克尔效应的高灵敏度测量。通过精确校准偏振器件, 验证了克尔转角与起偏器转角间的线性关系, 并测得克尔转角饱和值约为、克尔椭偏率约, 矫顽力约 0.4 T。实验发现反射三棱镜引入的系统性椭偏率 (约 0.5°) 是主要误差来源, 需在精密测量中通过差分法或光学补偿消除。数据表明克尔系数实部对应偏振旋转、虚部对应椭偏变化, 符合弱克尔效应近似理论, 验证了该方法的可靠性。本工作为磁性薄膜、自旋电子学材料的磁各向异性与畴结构研究提供了一种有效的实验手段。未来可结合变温测量, 探究温度对磁光系数的影响, 或扩展至横向克尔效应以分析面内磁化特性。

参考文献

- [1]. 《近代物理实验》(第四版)(普通高等教育国家级规划教材) – 吴思诚, 荀坤 – 4, 2015 – 高等教育出版社
- [2]. Q. Zhan, "Magneto-optical Kerr effect and its applications," **Journal of Physics: Condensed Matter**, vol. 19, no. 8, p. 083001, 2007.
- [3]. J. Kerr, "On rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet," **Philosophical Magazine**, vol. 3, pp. 321-343, 1877.
- [4]. P. N. Argyres, "Theory of the Faraday and Kerr effects in ferromagnetics," **Physical Review**, vol. 97, no. 2, pp. 334-345, 1955.
- [5]. 赵凯华, 钟锡华. 《光学》. 北京大学出版社, 1984.
- [*]. 项目文件地址: [huskychn-commits/PKU_Modern-Physics-Experiment_MagnetoOptical-Kerr-effect](https://github.com/huskychn-commits/PKU_Modern-Physics-Experiment_MagnetoOptical-Kerr-effect)

V. 附录

理论推导详见md文档。

VI. 思考题

（一）实验过程思考题

1、如何确定检偏器通光方向与光弹调制器的振动轴方向一致？

打开光弹调制器，无相差相关现象则说明光弹调制器主轴已对齐。

2、如何确定克尔转角的符号？

转动起偏器观察测得的克尔转角，克尔转角的转动方向与入射偏振方向转角方向应当是相反的（同一取光传播方向为视线方向）。

3、面偏振光经过反射棱镜后偏振状态会作何变化？如果将反射棱镜换成平面反射镜会有什么区别？

会产生额外的转角和椭偏率，详见分析程序。

4、为什么外加磁场为零时样品依然有不为零的克尔转角？

更严谨的表述是能够测到不为零的克尔转角，来源即是3中的效应。

（二）实验报告思考题

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？

不一样，取决于使用的锁相放大对基频和二倍频的测量精度。

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？

能测出克尔转角；但是理论推导指出，在最低阶近似下只能得到 $\sqrt{Q_K'^2 + Q_K''^2}$ ，即复克尔系数的模长；当然如果能够想办法测出相位（但这很困难，因为两个成分之间频率差四倍）。详见理论推导部分。