

法拉第效应

摘要：光在通过偏振片时，不同的偏振方向上的光吸收程度不同，偏振方向与入射光线平行时光通过最多，与入射光线垂直时光线被阻挡最多。本实验通过寻找电流最小的角度，再计算旋转的角度求出法拉第转角以及费尔德常数。

关键词：法拉第效应，旋光角，费尔德常数

一、引言

法拉第效应 1845 年由法拉第发现。法拉第效应可用于混合碳水化合物成分分析和分子结构研究。近年来在激光技术中这一效应被利用来制作光隔离器和红外调制器。由于法拉第效应的其他性质，他还有其他更多的应用。

法拉第效应可用来分析碳氢化合物，因每种碳氢化合物有各自的磁致旋光特性；在光谱研究中，可借以得到关于激发能级的有关知识；在激光技术中可用来隔离反射光，也可作为调制光波的手段。

法拉第旋光在强磁场下具有非互易性，这种非互易的本质在微波和光的通信中是很重要的。许多微波、光的隔离器、环行器、开关就是用旋转角大的磁性材料制作的。

二、实验原理

当线偏振光穿过介质时，若在介质中加一平行于光的传播方向的磁场，则光的振动面将发生旋转，这种磁致旋光现象是 1845 年由法拉第首先发现的，故称为法拉第效应。振动面转过的角度称为法拉第效应旋光角。实验发现

$$\theta = VBL \quad (1)$$

其中 θ 为法拉第效应旋光角； L 为介质的厚度； B 为平行与光传播方向的磁感强度分量； V 称为费尔德 (Verdet) 常数。

一般约定，当光的旋转方向与产生磁场的电流的方向一致时，称法拉第旋转是左旋， $v > 0$ ；反之则叫右旋， $v < 0$ 。

法拉第效应与自然旋光不一样，不具备一般的光学过程可逆，对于给定的物质，旋转的方向只由磁场的方向决定，和光的传播方向无关，这叫做法拉第效应的“旋光非互易性”。

法拉第效应的原理

一束平行于磁场方向传播的平面偏振光 E (E 表示电场强度矢量)，可以看着是两束等幅的左旋 E_L 和右旋 E_R 圆偏振光的叠加，不加外磁场时，他们通过距离为 L 的介质后，由于介质对他们具有相同的折射率和传播速度，所以他们产生的相位移相同，不发生偏转；当有外磁场时，由于磁场使物质的光学性质改变，这两束光具有不同的折射率和传播速度，产生不同的相位移：

$$\delta_L = 2\pi n_L l / \lambda \quad (2)$$

$$\delta_R = 2\pi n_R l / \lambda \quad (3)$$

其中 δ_L 和 δ_R 分别为左旋和右旋圆偏振光的相位； n_L 和 n_R 分别为左旋和右旋圆偏振光在介质中的折射率； λ 为真空中的波长。圆偏振光的电场强度矢量 \vec{E} 应始终位于 \vec{E}_L 和 \vec{E}_R 的角平分线上，可以导出

$$\delta_L + \varphi_F = \delta_R - \varphi_F, \text{ 即}$$

$$\varphi_F = \frac{1}{2} (\delta_R - \delta_L) = \pi (n_R - n_L) l / \lambda \quad (4)$$

若 $n_R > n_L$ ，有 $\varphi_F > 0$ ，表示右旋；若 $n_R < n_L$ ，有 $\varphi_F < 0$ 表示左旋。

利用经典的电动力学中的介质极化和色散的振子模型，原子中的被束缚的电子在光波电场的作用下作受迫振动。除光场外，再在介质上加上一个静电场 \vec{B} ，此时，电子的运动方程为

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + k \vec{r} = -e \vec{E} - e \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) \times \vec{B} \quad (5)$$

式中， m 是电子质量， $-e$ 是电子电荷， k 是偶极子的弹性恢复系数， \vec{r} 是电子离开平衡位置的位移。

对 (5) 进行求解约化，对于可见光， $\omega_0 = (2.7 \sim 4.7) \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ，且 B 较小时有

$$n_R^2 = 1 + \frac{Ne^2/m_0}{(\omega_0^2 - \omega^2 - \omega_L^2)}, \quad (6)$$

其中， $\omega_L = \frac{eB}{2m}$ ，为电子轨道磁矩在外磁场的经典拉摩尔进动频率； $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ ； N 表示单位体积内的电子数； ω_0 称为回旋加速角频率； ω 就是光场具有的时间变化下的角频率， ϵ_0 是真空的介电系数。

同理有

$$n_L^2 = 1 + \frac{Ne^2/m_0}{(\omega_0^2 - \omega^2 + \omega_L^2)}, \quad (7)$$

无磁场的介质的色散公式为：

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2/m_0}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (8)$$

由以上推到得出如下结论：

(1) 在加磁场的作用下，电子作受迫振动，振子的固有频率由 ω_0 变为 $\omega_0 \pm \omega_L$ ，这正是对应的吸收光谱的塞曼效应（倒塞曼效应）；

(2) 由于 ω_0 的变化导致了折射率的变化，并且左、右旋圆偏振光的变化是不同的，尤其是在 ω_0 接近 ω 时，差别更为突出，这就是法拉第效应。

实际上， n_L 、 n_R 和 n 相差微小，可以近似的认为

$$n_R - n_L = \frac{n_R^2 - n_L^2}{2n}. \quad (9)$$

将 (6)、(7)、(8) 代入 (9), 再利用条件 $L^2 \gg \lambda^2$, 整理得到

$$\varphi = - \frac{Ne^3}{2cm^2 n_0 n} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)} B L \quad (10)$$

式中 c 是光速。对 (8) 微分得到

$$\frac{dn}{d\omega} = \frac{Ne^2}{m_0 n} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}. \quad (11)$$

将 (11) 代入 (10) 中, 利用关系式 $\omega = 2\pi c/\lambda$, 得到

$$\varphi = \frac{e}{2cm} \frac{dn}{d\lambda} B L. \quad (12)$$

令

$$V = \frac{e}{2cm} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (13)$$

V 就是前面定义的费尔德常数, λ 为入射光波长, $\frac{dn}{d\lambda}$ 为介质在无磁场时的色散。

从上面的推导看, 左右旋只是相对于磁场方向而言的, 与光波的传播方向与磁场方向相同或相反无关, 因此, 法拉第效应是和自然旋光不一样的不可逆过程。

测量法拉第旋光角的光调制法

磁光调制器工作原理

在起偏器和检偏器之间插入一个由交变线圈磁化的磁光石榴石单晶膜, 就构成一个磁光调制器。当不加交变电流是, 起偏器和检偏器之间的夹角为 45° , 外加交变电流时, 产生一个旋光角 φ 。当 λ 不变时, 通过的光强 I 随 φ 变化, 而 φ 由磁场决定, 磁场又由电流决定, 所以光强实际由外加电流决定。这就是磁光调制器的工作原理。

最终光强的最大值和最小值实际由 λ 和 φ 决定, 当 $\lambda = 45^\circ$ 时, 有如下关系

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \sin 2\varphi \quad (14)$$

其中 M 叫做调制深度, 同时还有

$$\varphi = \frac{1}{2} \arcsin M \left(\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \right) \quad (15)$$

根据光强的最大值和最小值便可以求出 $\lambda = 45^\circ$ 时的光调制深度和调制角幅度 φ 。

磁光调制倍频法

在检偏器的前面加入一待测样品后，经过调制的线偏振光通过样品，当样品被磁化时，偏振面由原来的偏振方向 P 改变为 P' ，并在 $\theta_F \pm \theta$ 范围内摆动。

若检偏器允许通过的光的偏振方向 A 与 θ_F 的夹角为 θ 则光通过检偏器后的强度为

$$I = I_0 \cos^2(\theta_F \pm \theta) \quad (16)$$

展开上式中的余弦项，并且利用 θ 小角近似后得到

$$\cos^2 \theta_F \pm \theta = \cos^2 \theta_F - 2 \cos \theta_F \sin \theta_F \theta + \frac{1}{2} \sin^2 \theta_F (1 - \cos 2\theta) \quad (17)$$

上式第一项为一直流信号，第二项为基频信号，第三项为倍频信号。

当 $\theta = 90^\circ$ 时，倍频信号与基频信号相比可以忽略，所以只有基频信号；

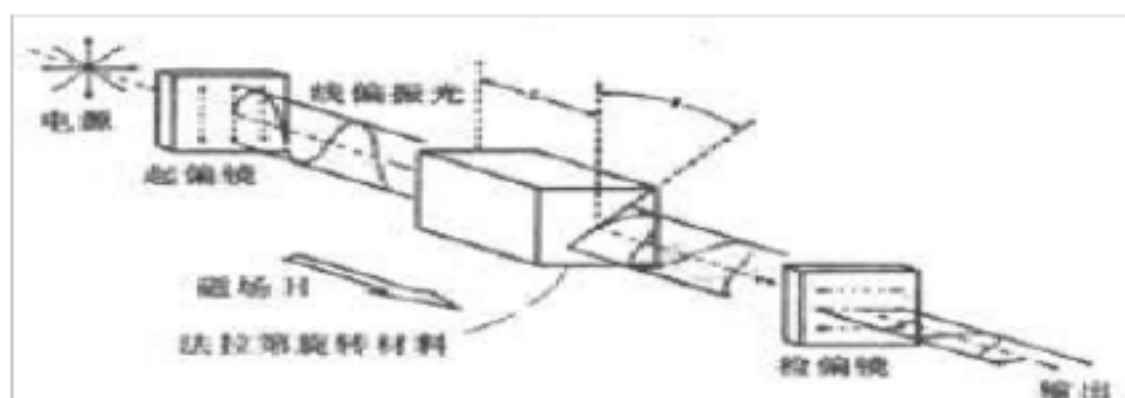
当 $\theta = 90^\circ$ 时，但很接近 90° 时，此时基频信号减小，出现倍频信号；

当 $\theta = 90^\circ$ 时，此时基频信号消失，只出现倍频信号。

测量时，根据放入样品前后出现倍频信号的位置就可以确定样品的法拉第旋光角。如果旋光角已知，则可以精确测量样品的厚度。

三、实验仪器

装置原理图如下所示



激光通过起偏器后称为线偏振光，经过磁光调制器调制后进入被测样品，出射后偏振面旋转 θ_F 角。被调制和旋转的线偏振光入射到检偏器，光电二极管接收后转变为电信号输入到放大器放大后输入示波器进行显示和测量。

实验仪器：氦氖激光器（输出波长为 632.8nm ）、电磁铁、起偏器、测角仪、光电二极管、电源。

四、实验步骤：

1. 确定磁场及光电倍增管的旋钮处于逆时针的最小位置，打开电源。
2. 磁场调零。
3. 光电倍增管电压换换调至 850V （必须 $<1000\text{V}$ ），调节过程中注意输出指示不可以过载。

- 缓慢转动检偏调节旋钮寻找消光点，这就是法拉第转角的零点。
- 固定光的波长为 500nm, 不断增大磁场值（必须 $\leq 600\text{mT}$ ），分别在 0，100，200，300，400，500，600mT处测量检偏角，算出法拉第转角。
- 再分别取波长为 550nm, 633nm, 700nm(沿一个方向缓慢转动波长调节旋钮)，分别在 0，200，400，600mT处测量检偏角，算出法拉第转角。
- 换一个样品重做步骤 5和6。
- 固定磁场值为 500mT, 在 400nm-700nm范围内间隔 50nm改变光的波长（沿一个方向缓慢转动波长调节旋钮），分别测量检偏角，取步骤 5或6中 0T 处的检偏角值为零点，计算法拉第转角、 费尔德常数。

注意事项：

- 先把磁场调零，光电倍增管的负电压调至绝对值小于 300V，然后再开电源、关电源以及换样品；
- 磁场处于最大值（ 600mT）的时间不能太长，否则仪器发热容易损坏；
- 尽量沿一个方向缓慢转动波长调节旋钮、检偏调节旋钮。

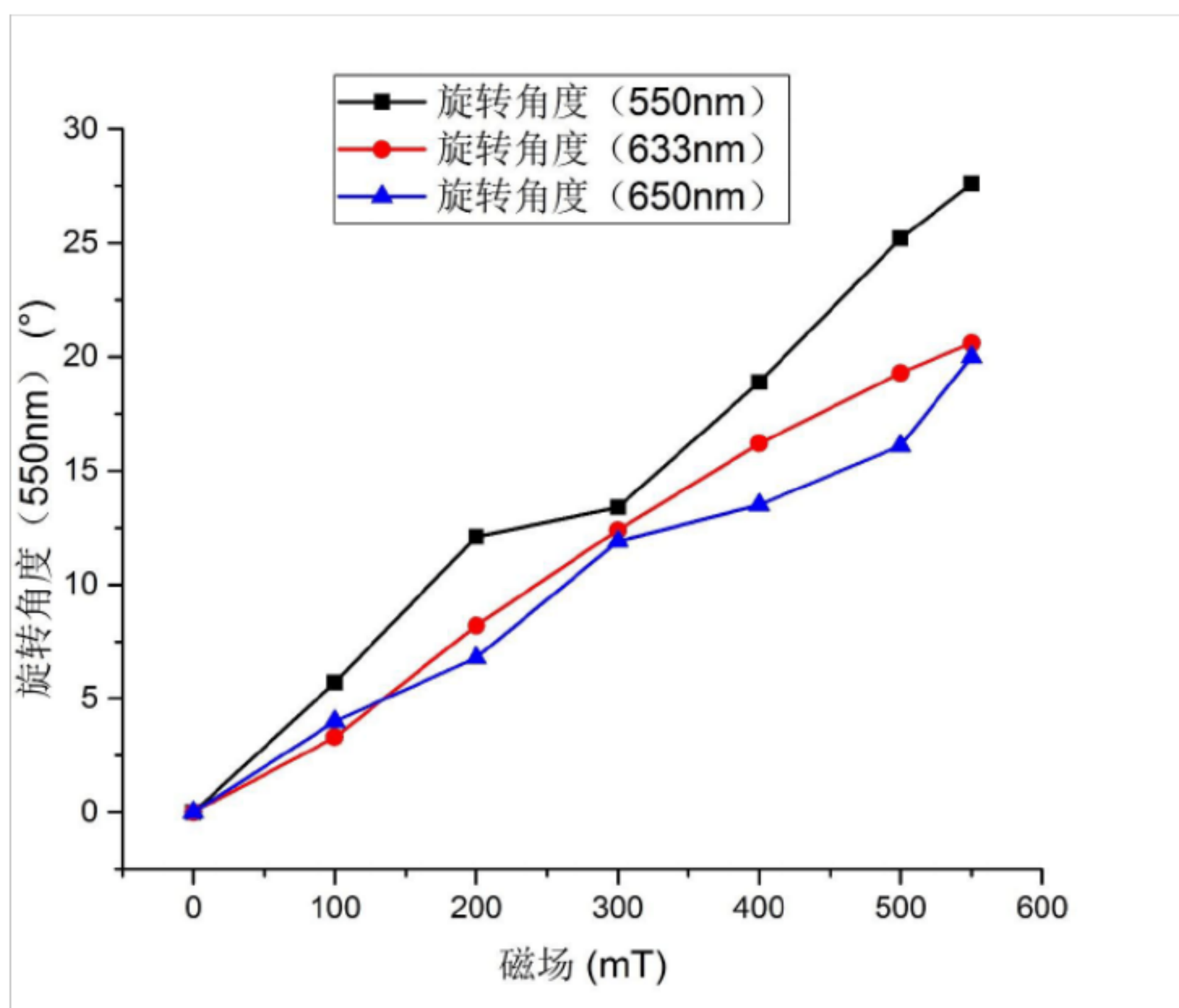
五、数据处理及误差分析

（1）一号样品长度为 L=7.76mm，实验数据记录如下

光源 550nm，光电 倍增管 800v		光源 633nm，光电 倍增管 800v		光源 650nm，光电 倍增管 800v	
磁场强度 /mT	度数 / °	磁场强度 /mT	度数 / °	磁场强度 /mT	度数 / °
0	87.1	0	86.6	0	88.0
100	81.4	100	83.3	100	84.0
200	75.0	200	78.4	200	81.2
300	73.7	300	74.2	300	76.1
400	68.2	400	70.4	400	74.5
500	61.9	500	67.3	500	71.9
550	59.5	550	66.0	550	68.0
磁场强度 /mT	变化度数 / °	磁场强度 /mT	变化度数 / °	磁场强度 /mT	变化度数 / °
0	0	0	0	0	0

100	5.7	100	3.3	100	4.0
200	12.1	200	8.2	200	6.8
300	13.4	300	12.4	300	11.9
400	18.9	400	16.2	400	13.5
500	25.2	500	19.3	500	16.1
550	27.6	550	20.6	550	20.0

旋转角度和磁场的关系如下图所示



分析：实验中线偏振光的偏振方向和产生磁场的电流的旋转方向一致，根据实验原理定义为左旋。

由上图可以看出 θ 与 B 基本上呈线性关系，斜率 k 的物理意义是费尔德常数 V 和样品厚度 L 的乘积，由此可以得 $V=k/L$ 。

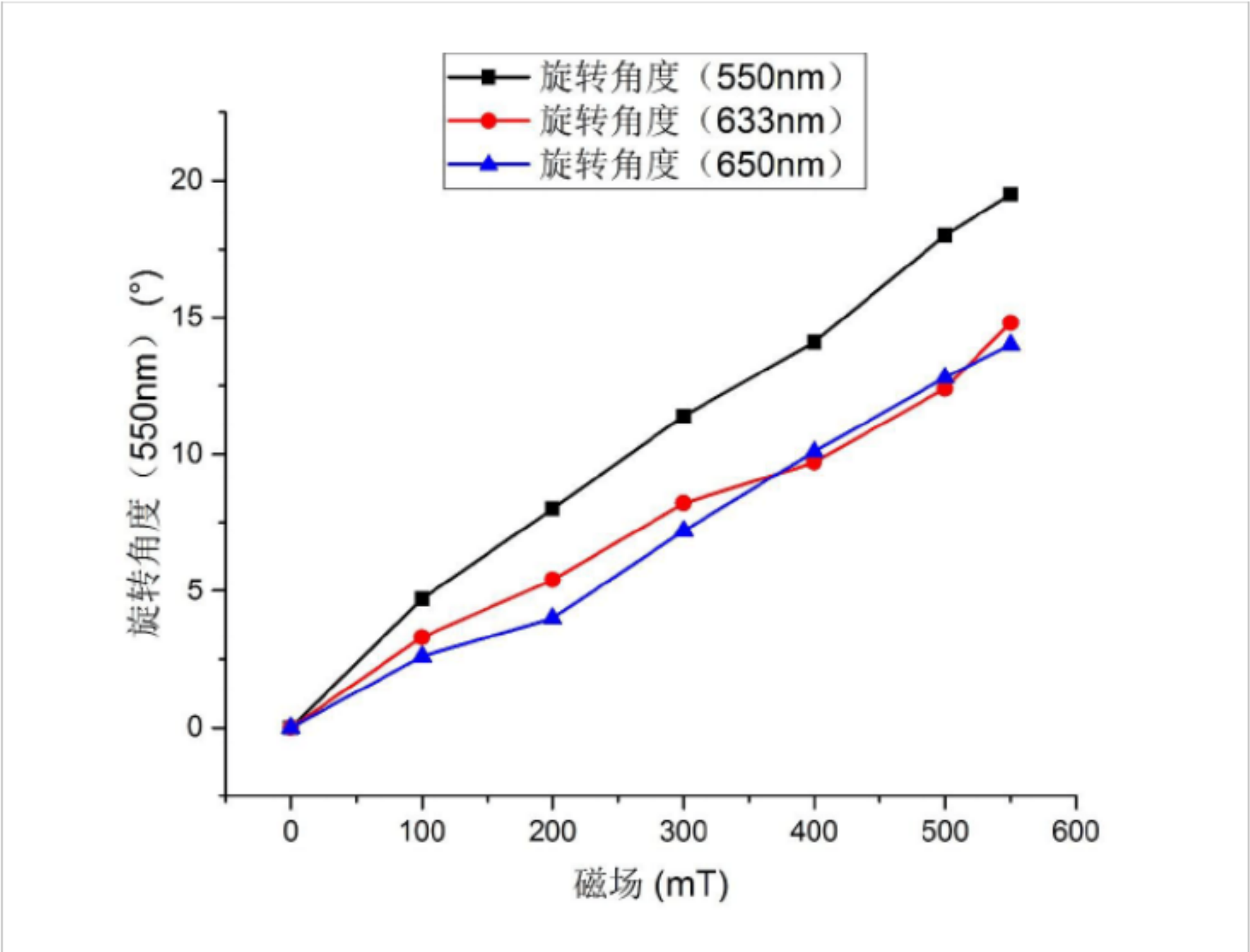
根据最小二乘法计算出斜率 k 代入上式，得出样品的费尔德常数如下表所示

光源波长 (nm)	费尔德常数 (° /cm · T)
550	62.42
633	49.69
650	43.98

(2) 二号样品长度为 L=7.60mm ，实验数据记录如下

光源 550nm ，光电 倍增管 800v		光源 633nm ，光电 倍增管 800v		光源 650nm ，光电 倍增管 800v	
磁场强度 /mT	度数 / °	磁场强度 /mT	度数 / °	磁场强度 /mT	度数 / °
0	88.0	0	87.7	0	87.7
100	83.3	100	84.4	100	85.1
200	80.0	200	82.3	200	83.7
300	76.6	300	79.5	300	80.5
400	73.9	400	78.0	400	77.6
500	70.0	500	75.3	500	74.9
550	68.5	550	72.9	550	73.7
磁场强度 /mT	变化度数 / °	磁场强度 /mT	变化度数 / °	磁场强度 /mT	变化度数 / °
0	0	0	0	0	0
100	4.7	100	3.3	100	2.6
200	8.0	200	5.4	200	4.0
300	11.4	300	8.2	300	7.2
400	14.1	400	9.7	400	10.1
500	18.0	500	12.4	500	12.8
550	19.5	550	14.8	550	14.0

旋转角度和磁场的关系如下图所示



和样品一的处理方法相同，得出样品的费尔德常数如下表所示

光源波长 (nm)	费尔德常数 (° /cm · T)
550	45.33
633	33.05
650	33.99

本实验误差来源：

消光法测量时光电流反应不够灵敏，最小值不够准确，导致对应的检偏器角度读取有误差；

光路不满足实验要求，精度不够导致测量不准确；

读数有一定误差。综合导致测量点不再一条直线上。

六、思考题

1.材料的法拉第效应的大小与哪些因素有关？

与磁场强度，材料的厚度，材料的费尔德常数有关。三者越大，法拉第效应越明显。

2.简述本实验测定法拉第转角所采用的试验方法？

光在通过偏振片时，不同的偏振方向上的光吸收程度不同，偏振方向与入射光线平行时光通过最多，与入射光线垂直时光线被阻挡。本实验寻找电流最小的角度，通过计算旋转的角度求出法拉第转角。

3.本实验的法拉第效应和透明磁性材料的法拉第效应有何异同？

磁性材料在磁场的作用下自身发生极化产生磁场叠加。所以磁性材料的法拉第效应较强。

4.有些材料除了有法拉第旋光效应以外，还有自然旋光，双折射现象，它们会影响本实验测量精度，用什么方法可以消除这些因素的影响？

自然旋光是可逆的，光线往返一周，累积旋光角为0，所以让光线在样品中往返一周可以减少自然旋光的影响；让光线尽量垂直入射到样品表面可以减少双折射现象的影响。

参考文献

[1] 黄润生，沙振舜，唐涛等，近代物理实验（第二版），南京大学出版社，2008.