

法拉第效应实验探究

刘万鹏 08300300053

复旦大学材料科学系，上海 200433

摘要：通过研究 ZF3 重火石玻璃的法拉第效应，即磁致旋光效应，探究磁偏转角与磁感应强度、波长的关系，以及费尔德常数与波长的关系，并反推出电子荷质比，以检验实验精度。发现柯西色散定理的局限性，以及磁偏转角与波长的非线性关系。

Abstract: A study of Faraday effect on ZF3 dense flint , to explore the relationship between magnetic inclination and magnetic induction and wavelength, and the relationship between Verdet constant and wavelength. Calculate electron charge mass ratio, to know the accuracy of the experiment. Finding the application of Cauchy dispersion formula is limited, and the relationship between magnetic inclination and wavelength is non-linear.

关键词：光学 法拉第效应（磁致旋光效应） 柯西色散 最小偏向角法

引言：1845 年，英国科学家法拉第发现：当一束线偏振光通过放在磁场中的非旋光性物质后，与原方向发生一定偏角。并且此偏角与磁感应强度 B 及穿过样品的厚度 D 有如下关系：

$$\alpha = VBD$$

比例常数 V 称为费尔德常数， B 为磁场强度， D 为样品厚度。

后来就把此现象称为法拉第效应，或磁致旋光效应。

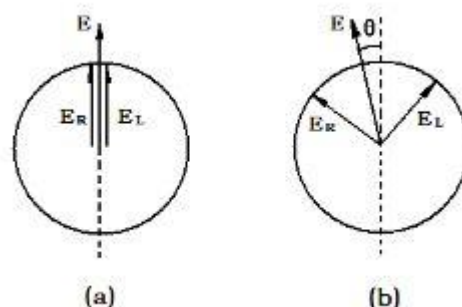
法拉第效应的旋光性与旋光物质的旋光性有明显的差别。线偏振光通过旋光物质，光的偏振方向旋转角度 θ ，当光被反射而沿相反方向第二次通过同一旋光物质后，又恢复到第一次通过旋光物质之前的偏振方向，即 $\alpha = 0$ ；若线偏振光通

过磁场中的磁性物质，由于法拉第效应，偏转方向也旋转 θ ，当光被反射而沿相反方向第二次通过同一旋光物质后，与第一次通过之前相比，偏振方向转过角度翻倍，即 $\alpha = 2\theta$ 。¹

经过一个半世纪的发展，法拉第效应已经有许多方面的应用。尤其是在激光技术中，利用法拉第效应制成的光隔离器或单通器，在激光多级放大技术和高分辨率激光光谱技术中是不可缺少的重要器件。此外，在激光通讯、激光雷达等技术领域，也广泛应用了基于法拉第效应的光频环形器、磁光调制器等。

理论：

法拉第效应，即：一束线偏振光通过放在磁场中的磁性物质后仍为线偏振光，但由于磁场中的磁性物质对线偏振光所分解成的两个同频率等振幅的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的折射率不同，以至于产生相位差，如右图，则：



$$\begin{aligned} \theta &= \omega (t_R - t_L) \\ &= \omega \left(\frac{D}{v_R} - \frac{D}{v_L} \right) \\ &= \frac{\omega D}{c} (n_R - n_L) \end{aligned}$$

于是，当它们在出介质时，合成的新的平面线偏振光与入射光转过一个角度，即为法拉第效应旋光角：

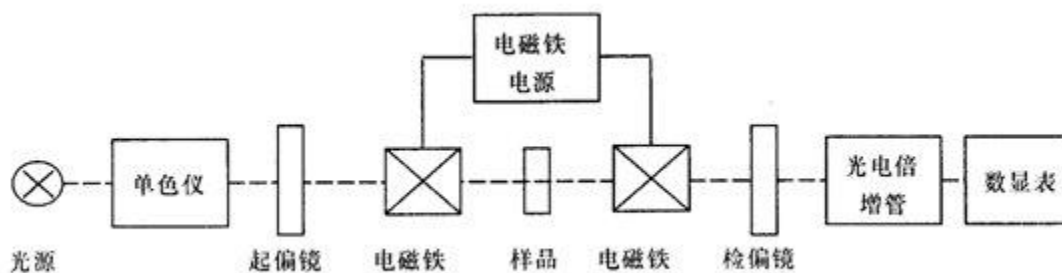
$$\alpha = \frac{\theta}{2} = \frac{\omega D}{2c} (n_R - n_L)$$

实验及分析：

主要光路图如下¹¹：

¹ 《近代物理实验》张天喆、董有尔，科学出版社

¹¹ 光路图引自复旦大学近代物理实验网站：<http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=course:modern>

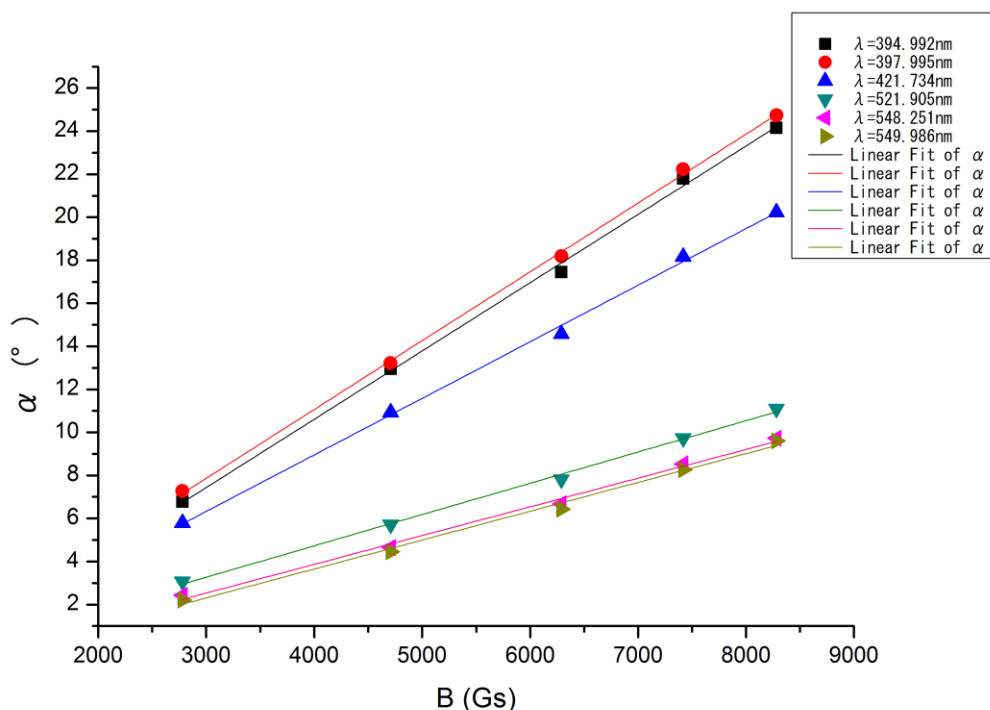


实验主要从以下几点来展开：

1、测量法拉第效应旋光角 α 与励磁电流 I 的关系：

首先增加电流 1A，电流逐渐增加，数显表的示值也同步增加，观察数显表示值从 0 增加到二位数左右；再旋转手轮，使角度表示值从 0° 增加到若干度数，使其中数显表的示值从二位数逐渐变到 0；关闭 1A 电流，观察数显表示值从 0 增加到该二位数，这时角度表的示值即为法拉第效应角；重复以上操作 3 次，记录数据，取其平均数以减小测量误差；同样，电流为 2A, 3A, 4A, 4.6A（实验室仪器无法达到 5A 电流）时做同样操作。

共测量了 6 个不同的鼓轮值对应的不同波长光的 α 与 I 关系的数据，经拟合得到如下图形：



即 $d=2.742\text{mm}$ 时， $\alpha = 3.924 \cdot I + 2.458$ （度），拟合度 0.98；

d=1.827mm 时, $\alpha = 4.760 \cdot I + 2.729$ (度), 拟合度 0.990;

d=1.950mm 时, $\alpha = 4.795 \cdot I + 3.126$ (度), 拟合度 0.991;

d=4.580mm 时, $\alpha = 2.185 \cdot I + 1.104$ (度), 拟合度 0.995;

d=4.890mm 时, $\alpha = 2.010 \cdot I + 0.529$ (度), 拟合度 0.998;

d=4.909mm 时, $\theta = 2.020 \cdot I + 0.296$ (度), 拟合度 0.998。

从图中可明显看出法拉第效应旋光角 α 与励磁电流 I 成一次函数关系, 即法拉第效应旋光角 α 随着励磁电流 I 的增加而成比例地增大。

2、测量法拉第效应旋光角 α 与波长 λ 的关系:

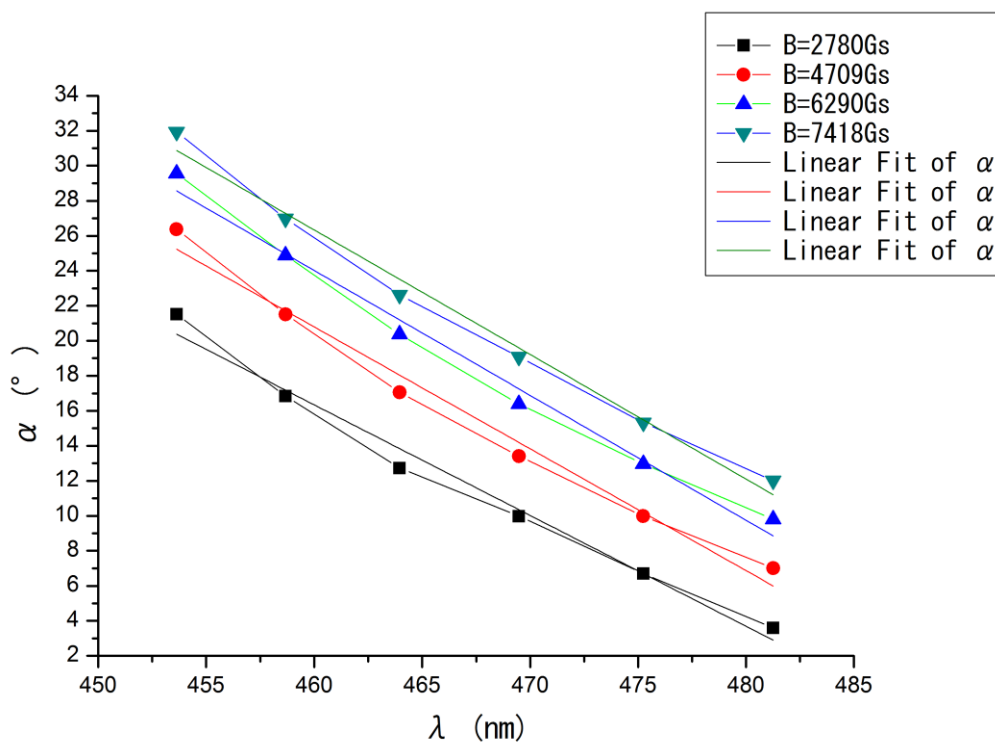
固定电流值为 1A, 测量法拉第效应旋光角 α 随鼓轮值 d 的变化关系, 每组测量 3 遍以减小测量误差。再以同样的操作方法测量电流值为 2A, 3A, 4A 时的数据。

再根据实验室提供的波长 λ 与鼓轮值 d 的关系:

$$\lambda = 24.367e^{d/2.283} + 340.746 \text{ (nm)}$$

可以得到法拉第效应旋光角 α 与波长 λ 的关系。

对数据进行直线拟合, 得:



I=1A 时, $\alpha = -0.602 * \lambda + 292.842$ (度), 拟合度 0.98;

I=2A 时, $\alpha = -0.696 * \lambda + 341.039$ (度), 拟合度 0.98;

I=3A 时, $\alpha = -0.714 * \lambda + 352.643$ (度), 拟合度 0.98;

I=4A 时, $\alpha = -0.712 * \lambda + 353.813$ (度), 拟合度 0.98;

法拉第效应旋光角 α 与波长 λ 大致成一次函数关系,法拉第效应旋光角 α 随波长 λ 的增大而线性减小。然而,我们从图中不难发现,虽然线性拟合度都高达0.98,但每条线的中间部分都在拟合直线的下方,显然这不是偶然,也就是说,法拉第效应旋光角 α 与波长 λ 成线性关系只是很粗略的估算,事实上他们的关系应该是反比例函数型的。

3、测量不同波长光在样品玻璃中的费尔德常数 V:

拿下样品玻璃,用高斯计测量不同励磁电流下原样品所在处的磁感应强度 B,并拟合得:

$$B = 1615.70 * I + 1188.97 \text{ (G)}, \text{ 拟合度 } 0.97.$$

$$\text{则 } I = (B - 1188.97) / 1615.70 \text{ (A)}$$

带入前面得到的法拉第效应旋光角 α 与励磁电流 I 的关系,得到法拉第效应旋光角 α 与磁场强度 B 的关系,因为 $\alpha = VBD$,测得样品厚度为 1.0cm,则带入后的方程的斜率即为费尔德常数 V。计算结果如下表:

d/mm	1.827	1.950	4.580	4.890	4.909
λ /nm	394.99	397.99	521.90	548.25	549.98
V/ (° /Gs*cm)	2.95	2.97	1.35	1.24	1.25

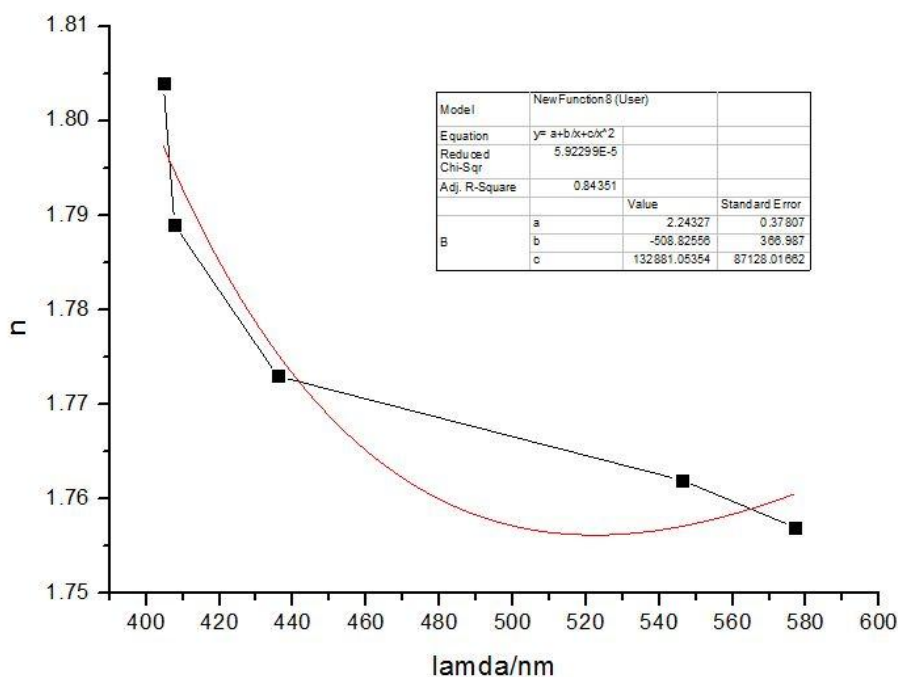
4、计算电子荷质比以验证实验精度:

用高压汞灯作为光源,测汞的特征谱线对应波长的光在样品中的最小偏向角,

再由公式 $n = \frac{\sin \frac{\theta + \theta_m}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}}$, 得到不同波长光在样品中的折射率。

式中 θ 为样品玻璃的顶角,测量得 60° , θ_m 为最小偏向角。

拟合图像如下:



拟合函数为 $n=2.24-508.82/\lambda +132881.05/\lambda^2$ ，拟合度 0.8。

我们之所以选择用 $y=a+b/x^2+c/x^4$ 的函数关系做拟合，是参照了比较经典的柯西色散定理，即 $n=a+b/\lambda^2+c/\lambda^4$ 。但拟合发现拟合度并不是很高，而且可明显看出拟合曲线在 520nm 左右出现极小值。这有悖于事实。参考资料^{III}发现，柯西色散定理也只是在一定波长范围内的近似效果较好。

对最小偏向角 θ_m 和波长 λ 做拟合得： $\theta_m = -0.02 * \lambda + 74.40$ ，则 $d\theta_m/d\lambda$

$= -0.02$ 。由公式 $\frac{dn}{d\lambda} = \frac{\cos \frac{\theta + \theta_m}{2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} * \frac{d\theta_m}{d\lambda}$ 算出 λ 与 $\frac{dn}{d\lambda}$ 的关系：

λ /nm	V/ (° /Gs*cm)	$\frac{dn}{d\lambda}/(10^{-3} \text{nm}^{-1})$	$\frac{e}{m}/(10^{11} \text{C/kg})$
407.70	2.81	-8.63	4.79
435.85	2.50	-9.26	3.72
546.07	1.29	-9.46	1.50
576.96	0.95	-9.56	1.03

注意：计算电子荷质比时先把 V 和 $\frac{dn}{d\lambda}$ 的单位化为国际单位。

^{III} 《美国麻省理工学院中级物理实验讲义》北京工业大学应用物理系编译，北京工业大学出版社

求平均数后得： $\frac{e}{m}=2.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$

与标准值 $1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 对照发现误差高达 56.8%。

不难发现，这个误差还是挺大的。分析误差较大，可能的原因主要有：

- (1) 运用大量拟合直线进行计算，引入大量计算误差。如 α 和 λ 的非线性关系，而计算是使用其直线拟合的结果；
- (2) 前期的光路调节、载物台水平调节、零点定标等调节不是特别准确；
- (3) 算法本身有问题。如 $V \sim \lambda$ 曲线拟合度低，查资料^{IV}发现费尔德常数 V 和波长 λ 并不是线性关系，而是

$$V = -\frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

总结：

法拉第效应旋光角 α 与磁感应强度 B 成线性关系，与波长 λ 的关系为非线性；折射率 n 和波长 λ 的关系虽然可用柯西色散公式计算，但在波长大于 520nm 时，用其计算所得结果精度较低。

致谢：

复旦大学近代物理实验中心马世红老师、白翠琴老师对实验的悉心指导；合作伙伴廖垠鑫同学对实验数据处理的建议。

参考文献：

- 《近代物理实验》张天喆 董有尔，科学出版社
- 《近代物理实验》叶柳 袁广宇 等，中科大出版社
- 《工程光学》田芊 廖延彪 孙利群，清华大学出版社
- 《光学》叶玉堂 饶建珍 肖峻等，清华大学出版社
- 《光学》赵建林，高等教育出版社
- 《大学物理（下册）》田志伟，浙江大学出版社
- 《美国麻省理工学院中级物理实验讲义》北京工业大学应用物理系编译，北京工业大学出版社
- 《大学物理实验》吴红玉 费金喜，浙江大学出版社

^{IV} 《近代物理实验》叶柳 袁广宇 等，中科大出版社