

法拉第效应

1845年法拉第(Michal Faraday)发现玻璃在强磁场的作用下具有旋光性,加在玻璃棒上的磁场引起了平行于磁场方向传播的线偏振光偏振面的旋转。此现象被称为法拉第效应。法拉第效应第一次显示了光和电磁现象之间的联系。促进了对光本性的研究。之后费尔德(Verdet)对许多介质的磁致旋转进行了研究,发现法拉第效应在固体、液体和气体中都存在。大部分物质的法拉第效应很弱,掺稀土离子玻璃的费尔德常数稍大。近年来研究的YIG等晶体的费尔德常数较大,从而大大提高了实用价值。

法拉第效应有许多重用的应用,尤其在激光技术发展后,其应用价值倍增。如用于光纤通讯系统中的磁光隔离器,因为偏振面的磁致旋转取决于磁场的方向,与光的传播方向无关,由此可设计成光隔离器,使光沿规定的方向通过同时阻挡反向传播的光,从而减少光纤中器件表面反射光对光源的干扰;磁光隔离器也被广泛用于激光多级放大技术和高分辨的激光光谱技术,激光选模等技术中。法拉第效应的弛豫时间不大于 10^{-10} 秒量级。在激光通讯,激光雷达等技术中已发展成类似微波器件的光频环行器、调制器等,利用法拉第效应的调制器(磁光调制器)在 $1\mu\sim 5\mu$ 的红外波段将起重用作用。且磁光调制器需要的驱动功率较电光调制器小的多。对温度稳定性的要求也较低。所以磁光调制是激光调制技术的重用组成之一,也常用于激光强度的稳定装置。又如作为重要的传感机理应用于电工测量技术中。在磁场测量方面,利用它弛豫时间短(约 10^{-10} 秒)的特点制成的磁光效应磁强计可测量脉冲强磁场、交变强磁场;利用它对温度不敏感的特点,磁光效应磁强计可适用于较宽的温度范围,如等离子体中强磁场、低温超导磁场;在电流测量方面,利用电流的磁效应和光纤材料的法拉第效应,可测量几千个安培的大电流或几千KV的高压电流等。

一、实验原理

法拉第效应是磁场引起介质折射率变化而产生的旋光现象,实验结果表明,光在磁场的作用下通过介质时,光波偏振面转过的角度 θ (磁致旋光角)与光在介质中通过的长度L及介质中磁感应强度在光传播方向上的分量B成正比,即

$$\theta = VBL \quad (5-3-1)$$

式中V称为费尔德常数,它表征物质的磁光特性。表5-3-1为几种材料的费尔德常数值。

由经典电子论对色散的解释可得出介质的折射率和入射光频率 ω 的关系为

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (5-3-2)$$

式中 ω_0 是电子的固有频率,磁场作用使电子固有频率改变为 $(\omega_0 \pm \omega_L)$, ($\omega_L = \frac{eB}{2m}$ 是电子轨道在外磁场中的进动频率)。

使折射率变为

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0[(\omega_0 \pm \omega_L)^2 - \omega^2]} \quad (5-3-3)$$

表 5-3-1 几种材料的费尔德常数 V (弧分/特斯拉·厘米)

物质	λ (nm)	V
水	589.3	1.31×10^2
CS_2	589.3	4.17×10^2
轻火石玻璃	589.3	3.17×10^2
重火石玻璃	589.3	$8 \sim 10 \times 10^2$
铈磷酸玻璃	500.0	3.26×10^3
YIG	830.0	2.04×10^6
(Y Tb) IG	1270	3.78×10^3

由菲涅耳的旋光理论可知，平面偏振光可看成由两个左、右旋圆偏振迭加而成，上式中的正负号反映了这两个圆偏振光折射率有差异，以 n_R 和 n_L 表示。它们通过长度为 L 的介质后产生的光程差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_R - n_L) \cdot L \quad (5-3-4)$$

由它们合成的平面偏振光的磁致旋光角为

$$\theta = \frac{1}{2}\delta = \frac{\pi}{\lambda}(n_R - n_L)L \quad (5-3-5)$$

通常， n_R ， n_L ，和 n ，相差甚微，故 $n_R - n_L \approx \frac{n_R^2 - n_L^2}{2n}$ 。将此代入上式，又因 $\omega_L^2 \ll \omega^2$ ，

可略去 ω_L^2 项，得：

$$\theta = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_R^2 - n_L^2}{2n} \cdot L = -\frac{Ne^3 \omega^2}{2cm^2 \epsilon_0 n} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \cdot L \cdot B \quad (5-3-6)$$

由 5-3-2 式可得

$$\frac{dn}{d\omega} = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0 n} \cdot \frac{\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \quad (5-3-7)$$

代入 5-3-6 式得

$$\theta = -\frac{e\omega}{2cm} \cdot \frac{dn}{d\omega} \cdot L \cdot B = \left[\frac{1}{2c} \cdot \frac{e}{m} \cdot \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right] \cdot L \cdot B \quad (5-3-8)$$

与 5-3-1 式相比可见括号项即为费尔德常数，表示 V 值和介质在无磁场时的色散率、入射光波长等有关。

由马吕斯定律可知，平面偏振光通过磁场中的介质和检偏器后的光强为：

$$I = I_0 \cos^2(\alpha + \theta) \quad (5-3-9)$$

α 为检偏器和起偏器透光轴的夹角， θ 为法拉第磁致旋光角。当 $\alpha = \frac{\pi}{4}$ 时，

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos 2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \right] \\ &= \frac{1}{2} I_0 (1 - \sin 2\theta) \approx \frac{1}{2} I_0 (1 - 2\theta) \end{aligned} \quad (5-3-10)$$

若磁场变化则 $I = \frac{I_0}{2} = I_0 V L B_0(i)$ 。表示此时由检偏器输出的光强将随产生磁场的电流 i

（调制电流）线性地变化，这就是光强度的磁光调制原理。在 $\alpha = \frac{\pi}{4}$ 时， $dI/d\alpha = 1$ ，即此时调制系统的信号检测灵敏度最高，失真最小。

若磁场为未知量，有(5-3-10)式通过测定输出光强来确定待测磁场，此即磁光效应磁强计的工作原理。若已知电流和磁场的关系，（如长直螺线管 $B = N_l I$ ），也可由此测定电流值，这就是用法拉第效应测量电流的依据——磁光电流传感器的工作原理。

二、实验内容

1. 测定单色光经样品的磁致旋光角随磁场变化的关系曲线及样品的费尔德常数。常用样品有 ZF-6 重火石玻璃、铈磷酸盐玻璃、轧铁石榴石薄膜等。显然，按法拉第效应产生的条件，实验装置应有三个部分组成，即光源系统、磁场和样品、检测系统。请你按实验室提供条件，选择各系统的具体实验器件，并画出实验框图。

2. 利用上述实验样品作为测量磁场的传感元件，模拟磁光效应磁强计测量待测磁场。如长直螺线管内的磁场及其分布，若已知电流和磁场的关系，可测定电流大小。

3. 观测并对比光束单次和多次往返通过样品时的磁致旋光角。法拉第效应的磁致旋光和自然旋光不同，对于确定的样品，光束偏振方向的旋转只取决于磁场方向，和光的传播方向无关。因此，光在介质中往返一次，其磁致旋光角将倍增。自然旋光现象则和光的传播方向有关，光在介质中往返一次，旋光角之和将为零。这是磁致旋光和自然旋光的重要区别。

4. 观察磁光调制现象。当改变起、检偏器透光方向的相对角度，输出信号如何变化？并和电光调制作比较。

三、实验提示

1. 磁场测量，一般选用特斯拉计，可按霍尔效应原理提出正确使用特斯拉计的要求和测试方法。若使用电磁铁，应注意消除电磁铁剩磁的影响，（怎样消除其影响？）调整励磁电流时应注意单方向调整（为什么？）。

2. 磁致旋光角测量

(1) 消光法，由检偏器在平面偏振光振动方向变化前后的消光位置来确定。由于消光位置附近光强变化率较小，确定消光位置较困难，可用半荫法或等值法来提高测量的准确度。

(2) 交流调制法，在光路中放置一个磁光调制器（置于线圈中的磁光介质装置），通过交变调制电流 $i = i_0 \sin \omega t$ 调制器线圈产生交变磁场 $B = B_0 \sin \omega t$ ，使光束的偏振方向发生小幅度的周期摆动，其摆角为

$$\beta = VLB_0 \sin \omega t = \beta_0 \sin \omega t \quad (5-3-11)$$

当检偏器透光方向和光束偏振方向的夹角为 φ ，则由检偏器输出光强为

$$I = I_0 \cos^2(\varphi + \beta) \quad (5-3-12)$$

由于摆角 β 很小， $\sin \beta \cong \beta$ ， $\cos \beta \cong 1$ ，则

$$\cos^2(\varphi \pm \beta) = \cos^2 \varphi \pm \beta^2 \sin^2 \varphi \mp 2 \cos \varphi \sin \varphi \cdot \beta$$

当 $\varphi = \pi/2$ ，即在消光位置， $\cos \varphi = 0$ ， $\sin \varphi = 1$ ， $\cos^2(\varphi \mp \beta) = \beta^2$ ，因而此时检偏器输出光强为

$$I = I_0 \beta_0^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} I_0 \beta_0^2 (1 - \cos 2\omega t) \quad (5-3-13)$$

表明检偏器在消光位置时，调制信号的基频消失，出现倍频信号，由此可用出现倍频信号来确定消光位置。如可用双踪示波器将倍频信号波形和调制信号波形比较确定，因此也可称为倍频法。

当 $\varphi = \pi/4$ ，由(5-3-10)式得由检偏器输出的光强为

$$I = \frac{1}{2} I_0 - I_0 \theta_0 \sin \omega t \quad (5-3-14)$$

将此光经光电探测器转换为电信号并输入电子处理系统，将光强中的直流和交流成分分开，再用模拟除法器作除法运算即得出磁致消光角 θ

(3) 双光束差动法，如上，将由磁光介质出射的平面偏振光经渥拉斯顿棱镜（或格兰棱镜等）分解为振动方向相互垂直的两束平面偏振光，设它们偏振方向和起偏器透光方向夹角为 $\frac{\pi}{4}$ ，则它们的光强分别为

$$I_1 = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) = \frac{1}{2} I_0 (1 + \sin 2\theta)$$

$$I_2 = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) = \frac{1}{2} I_0 (1 - \sin 2\theta)$$

经电子处理器将两路信号的和、差作除法运算，可得

$$\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \sin 2\theta \approx 2\theta \quad (5-3-15)$$

思考题

- 1.当样品通光方向有一定长度，使电磁铁极间距离接近或大于磁极线度，样品所处磁场将不均匀，对此，磁场测量应作何处理。
- 2.有些样品同时具有自然旋光性或双折射性等，怎样消除它们对实验结果的影响。
- 3.利用光强度的磁光调制，设计一个激光强度稳定装置。

参考资料

- | | |
|-----------|---|
| 1.母国光、战元龄 | 光学，十五章 |
| 2.吴思诚、王祖铨 | 近代物理实验 |
| 3.毛振龙 | 磁场测量 |
| 4.赵华风 | 激光实验选编 |
| 5.刘东力 | 磁致旋光角的测量，物理实验V ₀ . 1.8, N0.3 |