

实验 12 法拉第效应

引言

1845 年, 法拉第(Michal Faraday)在探索电磁现象和光学现象之间的联系时发现: 当一束平面偏振光穿过非旋光性介质时, 如果给介质沿光的传播方向加上磁场, 就会观察到光经过介质后偏振面转过 θ 角度(即磁场使介质具有了旋光性), 这种现象后来就称为法拉第效应。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光进行了研究, 发现了法拉第效应在固体、液体和气体中都存在。

法拉第效应有许多重要的应用, 尤其在激光技术发展后, 其应用价值越来越受到重视。如用于光纤通讯系统中的磁光隔离器, 是应用法拉第效应中偏振面的旋转只取决于磁场的方向, 而与光的传播方向无关, 这样使光沿规定的方向通过同时阻挡反方向传播的光, 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应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。在磁场测量方面, 利用法拉第效应的驰豫时间短(约 10^{-10} 秒)的特点制成的磁光效应磁强计可以测量脉冲强磁场、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, 可以测量几千安培的大电流和几兆伏的高压电流等。

实验目的

- 1 通过实验研究磁致旋光现象, 加深理解法拉第效应。
- 2 测出磁旋光玻璃的 θ -B 关系。
- 3 计算样品的费尔德常数。

实验原理

1 磁光效应

我们知道, 两个同频率的垂直简谐振动能够合成为一个圆运动, 同样, 一个圆运动可以分解成一对相互垂直的简谐振动。现在我们要讨论的是: 一个直线简谐振动可以分解为一对圆运动(即左旋圆偏振和右旋圆偏振为磁光介质中光波的两

种传播简谐模式, 这就是把一个直线简谐振动分解为一对圆运动的原因)。图 1, \vec{E}_L 和 \vec{E}_R 是两个大小相等(皆为 A)而不变的旋转矢量。它们的角速度($\pm\omega$)大小相等方向相反。设在 $t=0$ 时刻它们沿某一方向重合(图 1(a)), 由于过任意时刻 Δt 后两个矢量的角位移($\pm\omega t$)也大小相等方向相反, 它们的合矢量 \vec{E} 总保持在原来的方向上(图 1(b)), 这时 \vec{E} 的瞬时值为:

$$E = 2A \cos \omega t$$

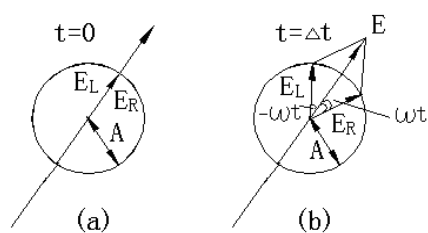


图1 左右旋圆运动合成直线简谐运动

由此可见， \vec{E}_L 和 \vec{E}_R 两个旋转矢量合成一个沿直线作简谐振动的矢量 \vec{E} ，其振幅为 $2A$ ，方向永远在 \vec{E}_L ， \vec{E}_R 瞬时位置的角平分线上。上述结论也可以反过来叙述：即一个沿直线作简谐振动的矢量 \vec{E} ，可以分解成一对左、右旋的旋转矢量 \vec{E}_L 和 \vec{E}_R ，它们的大小是矢量 \vec{E} 的振幅之半，角速度的大小是矢量 \vec{E} 的角频率 ω 。

运用这个原理到光学，就是线偏振光可以分解成左、右旋圆偏振光，而左、右旋圆偏振光可以合成为线偏振光。

2 磁致旋光 —— 法拉第效应

一束线偏振光通过具有磁矩的物质后，其偏振面相对于入射线偏振光发生了一定的旋转，这个现象称为磁致旋光效应，又称法拉第效应。

法拉第旋转角为：

$$\theta = \frac{\pi d}{\lambda} (n_R - n_L) = \theta_F d = VBd$$

θ_F 为光传播方向单位长度的旋转角，称为法拉第旋光率； V 叫费尔德常数； B 为磁感应强度。

应当注意：当光传播方向反转时，法拉第旋转的左右方向互换，这一点与自然旋光物质很不同，那里左、右旋是由旋光物质决定的，与光的传播方向是否反转无关。

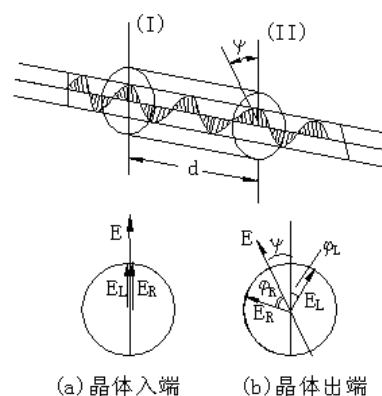


图2 旋光性的解释

测量原理和方法

本实验采用倍频法测量法拉第旋转角。根据马吕斯定律，经过起偏器，再经检偏器输出的光强为：

$$I(\alpha) = I_0 \cos^2 \alpha$$

式中 α 为起偏器和检偏器光轴之间的夹角， I_0 为 $\alpha=0$ 时的输出光强。

在两个偏振器之间插入一个由磁化线圈交变磁化了的磁光石榴石单晶式单晶薄膜样品，构成一个磁光调制器，如图 3 所示。

设由交变电流产生的交变磁场 \vec{H} 引起的交变法拉第旋转角为 θ' ，则如图 3 系统的输出光强度为：

$$I(a + \theta') = I_0 \cos^2 (a + \theta') = (I_0 / 2)[1 + \cos 2(a + \theta')] \quad (1)$$

当用正弦电流输入调制线圈，则在垂直石榴石单晶薄膜平面的方向上产生一个正弦变化

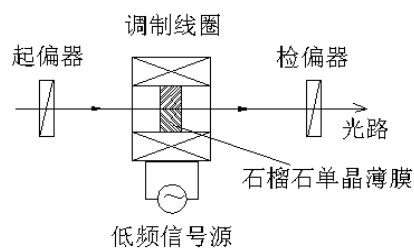


图3 磁光调制器

交变磁场，由此引起的交变法拉第旋转角 θ' 为：

$$\theta' = \theta'_0 \sin \omega t$$

式中 θ'_0 是交变法拉第旋转角 θ' 的幅度，称为调制幅度。由上可知，当 α 一定时，输入光强 I 仅随 θ' 变化，而 θ' 是受磁场 \vec{H} 控制的，因此 I 随 \vec{H} 而变化，这就是光强的磁光调制。显然，由于交变磁场 \vec{H} 引起的法拉第旋转使输出光强幅度变化（磁光调制幅度）为：

$$I_0 \cos^2(\alpha - \theta'_0) - I_0 \cos^2(\alpha + \theta'_0) = I_0 \sin 2\alpha \cdot \sin 2\theta'_0 \quad (2)$$

由上式可知，当 θ'_0 为定值时，磁光调制幅度随 α 而变化。 $\alpha=45^\circ$ 时，磁光调制幅度最大（如图 4 (a) 所示）。此时由 (1) 式得：

$$I(45^\circ + \theta') = (I_0/2)(1 - \sin 2\theta') \quad (3)$$

I 随 θ' 作正弦变化。

(1) 当 $\alpha=45^\circ$ 时， $\theta'_0=45^\circ$ 磁光调制幅度最大。

由 (3) 式可以看出，当 $\theta'_0 > 45^\circ$ 时，调波形将产生畸变。

(2) 当 $\alpha \neq 45^\circ$ 时， I 不仅与 θ' 有关，而且与 α 的变化也有关，因此调制波形及其幅度将随起偏器和检偏器相对位置 α 值而变化， $\theta'_0 < 45^\circ$ 也会引起调制波形的畸变，如图 4 (b)、4 (c) 所示。

(3) 当 $\alpha=90^\circ$ ，即两偏振器处于正交位置时，输出光强为：

$$I(90^\circ + \theta') = I_0 \cos^2(90^\circ + \theta') = (I_0/2)(1 - \cos 2\theta') \quad (4)$$

此时， I 是 θ' 的偶函数，输出光强仅与 θ' 的大小有关，即与交变磁场 \vec{H} 的大小有关，与磁场的方向无关。显然，此时输出调制信号的频率是输入调制信号频率的两倍（如图 4 (d) 所示）。由此可见，当我们用图 5 所示的测量装置检测出倍频信号时，即可确定两偏振器处于正交（“消光”）位置。

当 $\alpha=0$ 时，输出光强为：

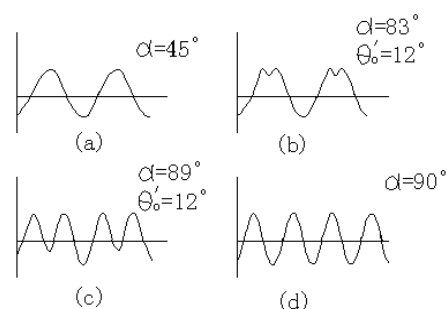


图4 波形的变化

$$I(\theta') = I_0 \cos^2 \theta' = (I_0 / 2)(1 + \cos 2\theta') \quad (5)$$

输出光强 I 的变化情况与 $\alpha=90^\circ$ 时相类似。从 (4)、(5) 两式可以看出, 在 $\alpha=0^\circ, 90^\circ$ 情况下, 磁光调制 (倍频信号) 幅度随 θ' 的增大而增大, 而 $\theta'_0=90^\circ$ 时, 其幅度最大。

法拉第旋转测量装置如图 5 所示, 由激光器出射的激光通过起偏器后成为线偏振光, 经磁光调制器调制后进入被测样品, 出射后偏振面旋转了 θ 角。被调制和旋转后的线偏振光入射到检偏器, 转换成交变的光电流, 经放大器放大后输入示波器的 y 轴, 在示波器荧光屏上就显示出被调制的信号。

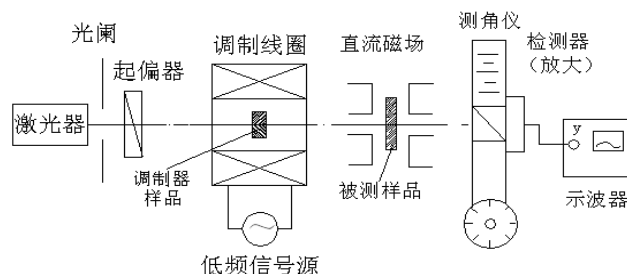


图5 测量装置示意图

根据被测样品放入前后两次出现倍频信号时的测角仪位置, 即可确定被测样品的法拉第旋转角 θ 。这个测量方法我们称之为磁光调制倍频法。用本实验所述倍频法, 测量所给样品的法拉第旋转角, 当所给样品的厚度已用其它方法测得, 求其单位厚度的旋转角; 反过来, 当某样品单位厚度的旋转角已知时, 此法可精确测量该样品的厚度。

实验内容

1 测定样品的 $\theta \sim B$ 关系

1) 把待测样品放入电磁铁的磁场中, 在不加励磁电流的状态下, 旋转测角仪手轮 (检偏器与之同轴旋转), 观察示波器显示的波形, 到示波器上出现倍频信号为止, 记录下测角仪上的刻度值 θ 。再给电磁铁供一励磁电流, 此时, 通过检偏器的直线偏振光的偏振面将会有一定的旋转, 示波器上显示的倍频信号将会发生变化, 需重新微调测角仪的手轮, 直到示波器上重新出现倍频信号时, 记录下此状态下的励磁电流值 I_1 及测角仪上的刻度值 θ_1 。如此重复以上操作过程, 得到不同电流 I_i 的状态下的 θ_i 值, 列表记录数据。

2) 取出待测样品, 将测量磁感应强度的特斯拉计的探头放入电磁铁的磁场中, 对应列表中的励磁电流 I_i , 测量其相应的磁感应强度 B_i 值。

3) $\theta_i - \theta_0$ 值就是相应的 B_i 对应下的 θ 值。以 B_i 为横坐标, θ_i 为纵坐标, 在直角坐标纸上作 $\theta-B$ 的关系图, 验证 $\theta=VBd$ 关系。

2 计算费尔德常数 V ($T^{-1} \cdot m^{-1}$): $V=\theta/Bd$

仪器简介

1 系统组成

LMG-II 型晶体磁光效应仪由氦氖激光器、电磁铁样品、起偏器 (包括偏振片、小角度摆幅装置)、测角仪 (包括检偏器)、光电接收、电源、特斯拉计、导轨、支架等组成。

2 各部分功能及主要技术参数

- 1) 氦氖激光器：输出波长：632.8nm，功率 $\leq 2\text{mW}$ ；
- 2) 电磁铁：采用电工纯铁做成磁路，磁极柱直径 $\varnothing 40\text{mm}$ ，磁路中通光孔直径为 $\varnothing 6\text{mm}$ ，以保证入射光的光轴方向与磁场 B 的方向一致。磁极间距为 8.5mm。给其励磁电流，产生相应的磁感应强度。
- 3) 样品，铅玻璃， $\varnothing 6 \times 8\text{mm}$ ；磁旋光高性能玻璃， $\varnothing 5 \times 6\text{mm}$ 。
- 4) 起偏器：产生小角度摆幅的直线偏振光，输入电压为 0-6V，50Hz。
- 5) 测角仪：具有刻度值的检偏器， 360° 的刻度值，附有 2" 的游标。
- 6) 光电接收：接收透过检偏器的光强。光电二极管响应时间小于 10^{-7}s ，光谱范围 0.4~1.1nm。
- 7) 电源：具有三个功能，一、为电磁铁提供励磁电流，输出电流连续可调，具有过流保护功能，数显电流表显示励磁电流值，单位为安培。过流保护点为 3A。二、为光电接收提供直流电源，并把接收到的光强信号转换为相应的电压值，供示波器显示用。三、为起偏器提供 0-6V、50Hz 的交变电压，使其产生小角度摆幅的直线偏振光。
- 8) 特斯拉计：测量磁极之间的磁感应强度，量程 0— $\pm 2\text{T}$ ，分辨率为 0.0001T。
- 9) 导轨：优质铝型材，长 1000mm。
- 10) 支架：支撑氦氖激光管、起偏器、测角仪、光电接收管。

仪器使用方法

1 连线

将封装在黑管内的氦氖激光管的电极引线与氦氖激光电源的输出按红对红、黑对黑对应相接，切勿接反!!! 否则会导致氦氖激光管损坏! 电磁铁的线包引线 with 电源的励磁电流输出对应相接。0-6V 的交流输出与起偏器上的引脚对应相接。

2 光路调节

- 1) 调节装有氦氖激光管的支架，使激光管位于激光架中心位置，并使其氦氖激光束从电磁铁磁路中的通光孔中通过。把待测样品置于磁极中。
- 2) 在电磁铁前放置起偏器，使激光束从起偏器盒上通光孔中通过。再放置测角仪、光电接收管。
- 3) 旋转测角仪手轮，使其通过检偏器后的光强为最小，此时表示起偏器与检偏器的偏振方向相互垂直。

3 开启电源开关

- 1) 不加励磁电流。调节 0-6V 交流输出的电位器旋钮，使起偏器作小角度摆幅的振荡，微调测角仪的手轮，观察示波器到出现倍频信号为止。记录下测角仪上的刻度值。如

此反复几次，记录刻度值。这就是起始角度值。

- 2) 把励磁电流的粗调旋钮拔打到 1 档，数显表显示其励磁电流值。同时，示波器上显示的倍频信号将发生变化，重新微调测角仪手轮，直到出现倍频信号为止，记录下此电流(对应此电流下的磁感应强度)和测角仪的刻度值。重复几次，作多组测量后，可取其平均值。减去起始角度值后即为此磁感应强度下的法拉第旋转角。
- 3) 如上逐级调节不同的励磁电流数值，测出其对应的法拉第旋转角，列表记录数据。
- 4) 取出待测样品，把特斯拉计的探头放入磁极中，测出上面不同励磁电流下相对应的磁感应强度 B 值，并记录其数据。

4 数据处理

把以上所测得的法拉第旋转角及相对应的磁感应强度 B 值作图，验证 $\theta=VBd$ 的关系式，并计算在此波长（632.8nm）下的费尔德常数 $V=\theta/Bd$ ， $d=8\text{mm}$ 。

思考题

- 1 如何判断起偏器和检偏器处于正交（“消光”）位置。
- 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 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。
- 4 利用光强度的磁光调制，设计一个激光强度稳定装置。

注意事项

- 1 氦氖激光管与氦氖激光电源之间的连接，必须红对红、黑对黑，严禁接错，否则将会引起激光管的寿命终止。
- 2 因光电管的接收灵敏度很高，只能在起偏器与检偏器相互垂直的状态下(此时透过检偏器的光强很小)使用，严禁用氦氖激光束直接照射。否则会损坏光电接收管。
- 3 因电磁铁的电感量很大，严禁在通有励磁电流的状态下断开励磁电流的连线。否则会因电磁铁产生的反电动势而遭电击。