

偏振与双折射实验

【引言】

麦克斯韦电磁理论揭示了光是一种电磁波。光的干涉和衍射说明了光的波动性，光的偏振和在光学各向异性晶体中的双折射现象则显示了光的横波性，这些都是对光的电磁波理论的有力证明。光的偏振现象现已广泛应用于科研、生产等实际工作中，如天文学、分子生物学、珠宝鉴别、医学诊断等领域。

【开篇设问】

1. 什么是自然光、部分偏振光、线偏振光、椭圆偏振光、以及圆偏振光？
2. 怎样用实验方法来区分自然光、部分偏振光、线偏振光、椭圆偏振光、以及圆偏振光？
3. 如何获得椭圆偏振光和圆偏振光？

【实验目的】

1. 观察与了解光在各向异性晶体中传播时产生的双折射现象和规律。
2. 观察光的偏振现象，掌握偏振光的基本规律。
3. 掌握一些光的偏振态的鉴别方法和测试技术。
4. 了解波片的性质。

【实验原理】

1. 光的偏振

麦克斯韦指出光波是一种电磁波。电磁波是横波，即相互垂直的振动矢量电场强度 E 和磁场强度 H 均垂直于波传播方向。由于光与物质相互作用过程中反应比较明显的是电矢量 E ，故此，常用 E 表征光波振动矢量，简称光矢量。光矢量可以取垂直于光传播的平面内的任意方向，根据其方向的分布或者变化规律，可以将光分为五种偏振状态（如图 1 所示为各偏振状态的光矢量在垂直于光传播方向的平面内）：线偏振光、自然光、部分偏振光、椭圆偏振光、以及圆偏振光。对于线偏振光而言，光矢量在光传播过程中始终保持方向不变，但其大小会随着相位变化，这时在垂直于光波传播方向的平面上光矢量端点轨迹是一直线，

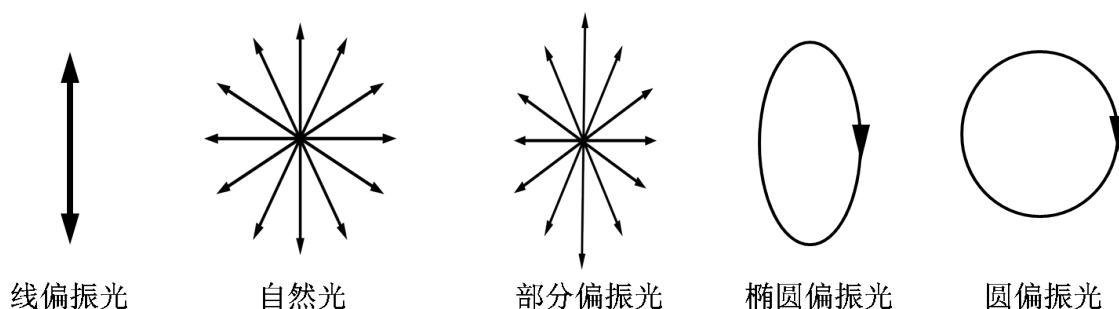


图 1 各偏振状态的光矢量在垂直于光传播方向的平面内的分布示意图

故此称之为线偏振光，因其振动方向与传播方向构成固定的平面，所以又被称之为平面偏振光（通常也简称偏振光）。图 2 是光路图中线偏振光的常用图示法，其中，短线表示光矢量与纸面平行，圆点表示光矢量与纸面垂直。单个分子或者原子发出的光一般为线偏振光，

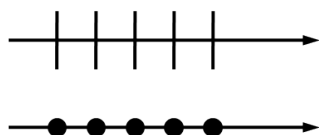


图 2 线偏振光的图示法

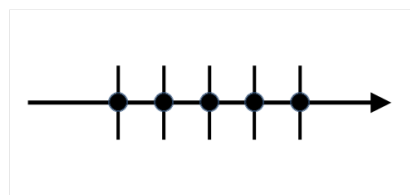


图 3 自然光的图示法

但由大量原子或者分子构成的普通光源，其光矢量会出现在垂直于传播方向的平面内的各个方向且彼此无关，如若光矢量在各不同方向出现的几率均等，则称之为自然光（光路图中常用如图 3 所示的图示法来表示自然光）；如若光矢量在各不同方向出现的几率不同，在某特定方向出现的几率最大，而在另某特定方向出现的几率最小（非零），则称之为部分偏振光。自然光经介质表面反射，或者在通过介质时由于不同方向的振动被吸收程度不同，而变为部分偏振光。如果其光矢量是随时间作周期性旋转，光矢量的末端在垂直于传播方向的平面上的轨迹是圆或者椭圆，这样的光相应地被称为圆偏振光或者椭圆偏振光，若从迎着光传播方向看旋转方向是逆时针的，则称左旋圆偏振光或者左旋椭圆偏振光，反之称右旋圆偏振光或者右旋椭圆偏振光。

线偏振光、椭圆偏振光、圆偏振光均可由两个频率相同、振动方向垂直、位相差恒定的线偏振光合成，比如

$$X = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$Y = B \cos(\omega t + \varphi + \Delta\varphi) \quad (2)$$

如果 $\Delta\varphi = n\pi$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 则合成的为线偏振光，若

$\Delta\varphi = n\pi \pm \frac{\pi}{2}$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 同时 $A = B$ ，则合成的为圆偏振光，其他情况则

合成椭圆偏振光，椭圆的形状、旋转方向等由 A 、 B 以及 $\Delta\varphi$ 决定。

2. 双折射现象与基本规律

当一束光入射到光学各向异性的介质时，折射光往往有两束，这种现象称为双折射。冰洲石（一种无色透明的方解石）就是典型的能产生双折射的晶体，如通过它观察物体可以看到两个像，如图 4 (a)。当一束激光正入射于冰洲石时，若表面已抛光则将有两束光出射，如图 4 (b)。

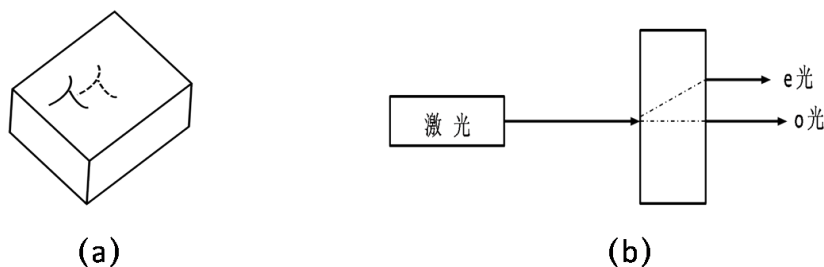


图 4 冰洲石的双折射现象

图 4 (b) 所示在正入射情况下发生的双折射中，其中一束光不偏折，即图中的 o 光，

它遵守通常的折射定律，称为寻常光（ordinary ray）。另一束发生了偏折，即图中的 e 光，它不遵守通常的折射定律，称为非常光（extraordinary ray）。用偏振片检查可以发现，这两束光都是线偏振光，但其振动方向不同，其两束光的光矢量近于垂直。晶体中可以找到一个特殊方向，在这个方向上无双折射现象，这个方向称为晶体的光轴，也就是说在光轴方向 o 光和 e 光的传播速度、折射率是相等的。此处特别强调光轴是一个方向，不是一条直线。这与几何光学中的光轴是不同的。只有一个光轴的晶体称为单轴晶体，如冰洲石、石英、红宝石、冰等；有一些晶体有两个光轴方向，此种晶体称为双轴晶体，双轴晶体有云母、蓝宝石、橄榄石、硫磺等。

单轴晶体中，若其 o 光折射率大于 e 光折射率（ $n_o > n_e$ ），o 光传播速度小于 e 光传播速度（ $v_o < v_e$ ），则称之为负晶体。冰洲石、硝酸钠、电气石等为负晶体。若 $n_o < n_e$ ， $v_o > v_e$ ，则此种晶体称为正晶体。石英、冰等为正晶体。

由界面法线与晶体光轴构成的平面称为主截面。当入射光在主截面内时，即入射面与主截面重合时，则 o 光与 e 光均在入射面内，否则 e 光不在入射面内。晶体中光轴与折射线构成的平面称为主平面。当主截面与入射面重合时，两个主平面也重合且与主截面重合。实际使用时有意选取此情况。一般情况下，e 光之主平面与 o 光之主平面并不重合。o 光的电矢量 E_o 垂直于 o 光的主平面，e 光的电矢量 E_e 在 e 光的主平面内。由于两个主平面的夹角很小，所以 E_o 与 E_e 近乎垂直。

3. 线偏振光的获得与检验

获得线偏振光的方法可以有多种，比如利用一些材料的二向色性可以将非线偏振光变成线偏振光，因为光线通过这种材料时，光矢量为某特定方向的光波会被全部吸收，而光矢量与之垂直的光波则几乎不吸收，从而使得出射光为单一振动方向的线偏振光；通过反射的方式也可以获得线偏振光：当光线在两介质（比如空气和玻璃）表面反射时，如果入射角满足一定的条件，则反射光为线偏振光，这时出射光一般为部分偏振光，不过要是经过多次处理，比如利用玻璃堆，出射光也可以是线偏振光；此外，利用晶体的双折射现象也可以获得线偏振光。能将非线偏振光变为线偏振光的器件称为起偏器。同样的器件也可以用来检验线偏振光，这时称之为检偏器。线偏振光通过检偏器后的光强（如图 5）满足马吕斯定律，即 $I = I_0 \cos^2 \theta$ ，其中 θ 是入射线偏振光光矢量方向与检偏器通光方向之间的夹角。据此定律可以验证线偏振光。

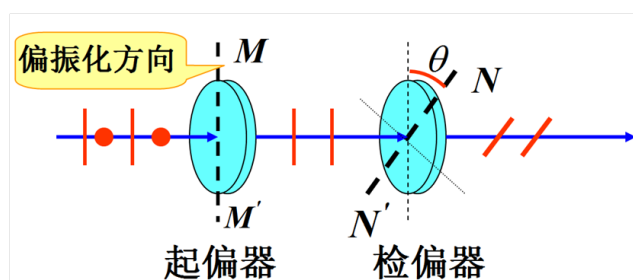


图 5 线偏振光通过检偏器后的光强

4. 波片——位相延迟器

波片是由双折射晶体制成的平板状光学元件，其光轴平行于表面，也称位相延迟器。

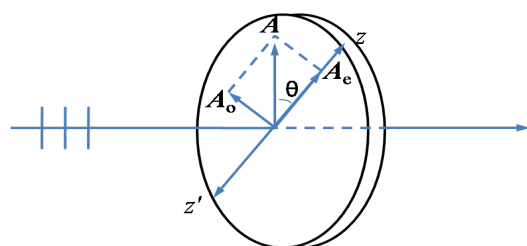


图 6 波片

如图 6 所示，光轴为 zz' 方向，有一线偏振光垂直入射，光矢量 A 向上，与光轴夹角为 θ 。则入射光在晶片表面即分解为 o 光和 e 光，均沿原方向传播。但在晶片内，其传播速度是不同的。经过波片厚度为 d 的路程后，两束光的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d \quad (3)$$

式中, λ 为真空中的波长, 对于确定的双折射晶体, n_o 、 n_e 已确定, 其相位差随晶片厚度而变化。若 $n_o > n_e$ (负晶体), 则 $\delta > 0$, 表示 e 光超前; 若 $n_o < n_e$ (正晶体), 则 $\delta < 0$, 表示 o 光超前。调节厚度 d , 可以做成四分之一波片 (简称 $\lambda/4$ 波片), 二分之一波片 (简称 $\lambda/2$ 波片) 和全波片, 其条件分别为

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{4} \text{波片} \quad (n_o - n_e)d &= \pm \frac{\lambda}{4} \text{ 或 } \delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d = \pm \frac{\pi}{2} \\ \frac{\lambda}{2} \text{波片} \quad (n_o - n_e)d &= \pm \frac{\lambda}{2} \text{ 或 } \delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d = \pm \pi \\ \text{全波片} \quad (n_o - n_e)d &= \pm \lambda \text{ 或 } \delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d = \pm 2\pi \end{aligned} \quad (4)$$

一般的晶片不可能做得如此薄, 通常都在 (4) 式表示的数值上加波长的整数倍, 这样并不改变其波片性质。

线偏振光垂直通过波片后其 e 光和 o 光分量会重新合成新的偏振状态的光, 具体是哪一种偏振状态取决于 e 光和 o 光两分量的位相差和入射光矢量与波片光轴之间夹角 (即图 6 中的 θ 角)。不难发现, 线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片后, 无论 θ 角如何, 出射光都依然是线偏振光, 只是其振动方向转过了 2θ 。线偏振光通过 $\lambda/4$ 波片后, 当 θ 为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 等时, 出射光为线偏振光; 当为 45° 、 135° 、 225° 、 315° 等时, 出射光为圆偏振光; 当为其他角度时, 出射光为椭圆偏振光。

5. 线偏振光通过波片和检偏器后的光强

如图 7 (a) 所示为测量线偏振光通过波片和检偏器后光强分布的实验装置。光源发出的光经起偏器 P_1 后变成了线偏振光, 其光矢量 A 的方向为 P_1 的通光方向, 该线偏振光正入射到波片 C 上, 发生双折射得到 o 光和 e 光, o 光和 e 光的强弱取决于波片光轴与 P_1 通光方向之夹角 θ , 如图 7 (b) 所示。从波片 C 出射后, o 光和 e 光将依角 θ 和波片 C 的不同而合成新的不同偏振状态的光, 利用检偏器 P_2 可以检测所得偏振光的强度分布。下面分析通过检偏器后光强的分布规律。

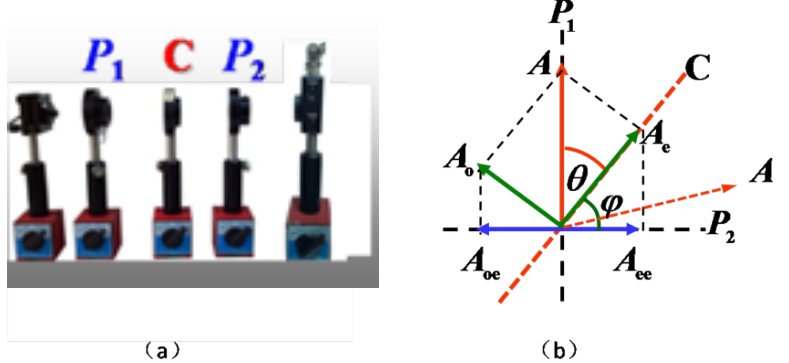


图 7 线偏振光通过波片和检偏器后的光强测量装置和原理图

波片中产生的 o 光和 e 光的光矢量振幅分别为:

$$A_o = A \sin \theta$$

$$A_e = A \cos \theta$$

A_o 、 A_e 通过波片 C 后将产生一相位差 δ , 由 (4) 式表示。通过 C 之后的 A_o 、 A_e 只有与 P_2 通光方向平行之分量 A_{ee} 、 A_{oe} 才能通过 P_2 :

$$A_{ee} = A_e \cos \varphi = A \cos \theta \cos \varphi$$

$$A_{oe} = A_o \sin \varphi = A \sin \theta \sin \varphi$$

(5)

式中 φ 是 P_2 通光方向与波片 C 光轴方向之夹角。 A_{ee} 与 A_{oe} 有一相位差 δ' ，它包含了波片产生的相位差 δ ，还包含坐标轴投影引起的相位差 π 。 A_{ee} 和 A_{oe} 有相同的振动方向和频率，且相位差恒定，能够产生干涉现象，合成后的光矢量 A_2 的大小为

$$A_2 = \sqrt{A_{ee}^2 + A_{oe}^2 + 2A_{ee}A_{oe}\cos\delta'} \quad (6)$$

其干涉光强 I 为

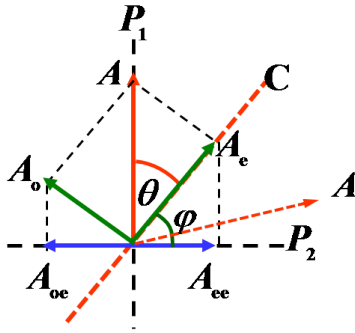
$$\begin{aligned} I &= A_2^2 = A_{ee}^2 + A_{oe}^2 + 2A_{ee}A_{oe}\cos\delta' \\ &= A^2(\cos^2\theta\cos^2\varphi + \sin^2\theta\sin^2\varphi + 2\cos\theta\sin\theta\cos\varphi\sin\varphi\cos\delta') \end{aligned} \quad (7)$$

前两项仅与 P_1 、 P_2 、C 的方位有关，后一项不仅与其方位有关，而且还与晶体的性质有关。

当 C 是 $\lambda/2$ 波片时，(7) 式中 $\delta' = \pi + \pi = 2\pi$ ，从而

$$\begin{aligned} I &= A_2^2 = A_{ee}^2 + A_{oe}^2 + 2A_{ee}A_{oe}\cos 2\pi \\ &= A^2\cos^2(\varphi - \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

(8) 式表明，从波片 C 出射的光依然是线偏振光（满足马吕斯定律），但偏振方向旋转了 2θ ，如图 8 所示，出射光和入射光的偏振方向相对波片光轴对称。此外，通过作图的方法也很容易得出同样的结论。



当 C 是 $\lambda/4$ 波片时，(7) 式中 $\delta' = \pi/2 + \pi = 3\pi/2$ ，从而

$$\begin{aligned} I &= A_2^2 = A_{ee}^2 + A_{oe}^2 + 2A_{ee}A_{oe}\cos 3\pi/2 \\ &= A^2(\cos^2\theta\cos^2\varphi + \sin^2\theta\sin^2\varphi) \end{aligned} \quad (9)$$

图 8 线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片后

一般情况下，线偏振光通过 $\lambda/4$ 波片后为椭圆偏振光，故 (9) 式也是椭圆偏振光通过检偏器后的光强分布公式，其中 θ 取某个固定的值，它决定了椭圆的形状，特别地，当 θ 取 0 、 $\pi/2$ 等时，从波片 C 出射的光为线偏振光；当 θ 取 $\pi/4$ 、 $3\pi/4$ 等时，从波片 C 出射的光为圆偏振光。

【实验仪器】

本实验仪器包括防震光学平台，半导体激光，冰洲石，偏振片（作起偏器或检偏器用）， $\lambda/4$ 波片， $\lambda/2$ 波片，光电转换器，光电检流计，以及磁力光具座等。详见图 9-图 12。



图 9 实验装置



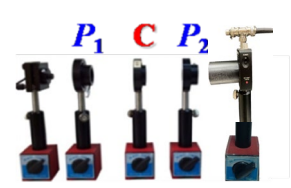
图 10 光电转换器的正面（其中的长方形部分是实行光电转换的核心部件，也即光电二极管）和侧面



图 11 光电检流计面板

2. 验证线偏振光经过 $\lambda/2$ 波片后偏振方向的变化规律

1) 在上一光路图中加入 $\lambda/2$ 波片 C (如图 14), 并进行同轴等高调节。



验证线偏振光经过 $\lambda/2$ 波片后偏振方向变化规律的测量数据

C位置/ $^{\circ}$	φ_{C_0}	$\varphi_{C_0}+10$	$\varphi_{C_0}+20$	$\varphi_{C_0}+30$	$\varphi_{C_0}+40$	$\varphi_{C_0}+50$
P_2 消光位置/ $^{\circ}$						

图 14 实验内容 2 的装置图

- 2) 验证线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片后依然为线偏振光的特性
- 3) 测量线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片后偏振方向的变化规律: 将 P_2 转到消光位置, 记下此时 C 的位置为 φ_{C_0} 及 P_2 的位置, 此后依次将 C 旋转 10° , 然后将 P_2 转到再次消光的位置并记录之 (注意, 在此过程中, P_2 的旋转方向要和 C 保持一致)。

3. 观测椭圆偏振光通过检偏器后的光强分布

- 1) 将上图中的 $\lambda/2$ 波片 C 移走, 调节 P_2 的透光方向, 使其与 P_1 的透光方向垂直 (此时从 P_2 出射的光强为最小, 亦即消光), 记下此时 P_2 的角度读数
- 2) 在 P_1 和 P_2 之间放置 $\lambda/4$ 波片 C' 并调节同轴等高 (如图 15)。转动 C' 使再次消光, 记下此时 C' 的角度读数。
- 3) 将 C' 转动 30° , 得相应的椭圆偏振光。

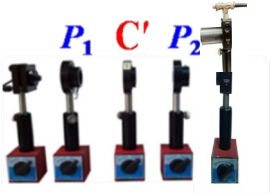


图 15 实验内容 3 的装置图

- 4) 记下此时光电检流计上的读数于数据表格 $\varphi = 60^{\circ}$ 的位置, 将 P_2 转动 10° , 若光强减小, 将其记录到 70° 的位置, 此后继续依次沿同一方向转动 10° , 并按正序记录数据, 350° 测完后接 0° ; 如果第一次将 P_2 转动 10° 时光强增大, 则按倒序记录数据, 0° 测完后接 350° 。

椭圆偏振光光强测量数据 P_2 消光的角度: ____, C' 消光的角度: ____

P_2 位置 $\varphi / ^{\circ}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
光强/ $10^{-7}A$									
P_2 位置 $\varphi / ^{\circ}$	90	100	110	120	130	140	150	160	170
光强/ $10^{-7}A$									
P_2 位置 $\varphi / ^{\circ}$	180	190	200	210	220	230	240	250	260
光强/ $10^{-7}A$									
P_2 位置 $\varphi / ^{\circ}$	270	280	290	300	310	320	330	340	350
光强/ $10^{-7}A$									

4. 观察光学各向异性晶体中的双折射现象 (选做)

将冰洲石放在写有字的纸上, 裸眼观察或者用手机摄像头对准冰洲石拍照观察, 记下观察现象。

5. 判别 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片 (选做)

根据 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片的特点, 自行设计方案

提示：在两个正交的偏振片之间插入 $\lambda/4$ 波片或 $\lambda/2$ 波片，首先转动波片使再次消光。再转动波片 45° ，若为 $\lambda/4$ 波片，则通过波片后为圆偏振光，若为 $\lambda/2$ 波片，则通过波片后仍然为线偏振光，但振动方向转过了 90°

6. 观测圆偏振光通过检偏器的光强（选做）

【数据处理】

1. 对实验内容1，用直角坐标作 $I - \cos^2 \theta$ 曲线，验证马吕斯定律，给出结论并分析。
2. 对实验内容 2，给出结论并分析。
3. 对实验内容 3，用极坐标作 $I-\varphi$ 曲线，另作 $I-\varphi$ 理论图（理论公式见（9）式，其中 θ 为 30° ，参数值 A 可用如下方式求出：先由（9）式推得 I_{\max} 或者 I_{\min} 的表达式，再将它和实验数据中的最大或者最小值比较，从而得到 A 值）；此外，求出光强最大值（ I_{\max} ）与光强最小值（ I_{\min} ）之比值，并和理论比值进行比较。对上述各项实验和理论结果进行分析。
4. 对选做内容，给出结论并分析。

【注意事项】

1. 严禁逆激光照射方向直视激光，以免损伤视力。
2. 严禁用手触摸光学晶片。
3. 实验完毕，将光电转换器侧面的开关拨到“O”状态

【参考文献】

- [1] 杨晓雪等. 大学物理. 武汉：华中科技大学出版社， 2010
- [2] 熊永红等. 大学物理实验(第一册). 北京：科学出版社， 2007
- [3] 任忠明等. 大学物理实验(第二册). 北京：科学出版社， 2007