



实验二十一

观察光的偏振现象

Bryan

1 基本的偏振现象

1.1 Brewster 定律之检验

据 Brewster 定律, 当自然光沿 Brewster 角入射到介质表面上时, 其 p 波反射率为 0, 这便得到了只有 s 分量的线偏反射光。由此定律便可构造偏振光镜, 如图所示:

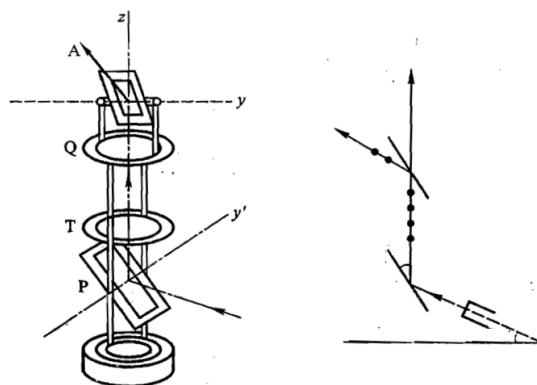


图 1: 偏振光镜及其光路示意图

摘自实验教材

装置 P 的入射角即为 Brewster 角。此时, 用偏振片检验 P 的反射光, 可见检偏器透振方向沿 y' 时透光最大, 沿垂直 y' 时几乎消光。由此可得, P 的反射光基本可近似为沿 y' 方向即 s 方向的线偏振光, 与 Brewster 定律吻合。

进一步, 绕 z 轴转动 A , 观察到如下现象:

1. 两反射面平行时, A 之反射光极强, 透射光较弱; 转动 A , 此时光线入射角不变, 然而反射光渐弱, 透射光渐强; 转角达 90° 时, 反射极弱, 透射极强; 继续转动 A , 光强又逐步增大, 至 180° 时光强与 0° 情形基本一致。顺、逆时针转动规律一致。

2. 注意到, 透射光强的变化趋势与反射光强变化趋势恰好相反。

这一现象与 Brewster 定律一致。绕 z 轴转动 A 的过程中, 入射角恒为 Brewster 角, 然在介质 A 看来, 入射光的 p, s 成分发生了变化; 具体而言, 记转角为 ϕ , 有:

$$E_s = E_{s,0} \cos \phi, \quad E_p = E_{p,0} \sin \phi,$$

由 Brewster 定律, 此时反射光仅有 s 波成分, 其强度正比于 $|E_s|^2$ 即 $\cos^2 \phi$, 故有上述的振荡变化规律。结合能量守恒, 即可解释透射光的变化规律。



$\phi = \pm \frac{\pi}{2} = \pm 90^\circ$ 处是理论上的反射光消光位置, 实际反射光存在但极弱; 由于激光输入的光强极大, 此时的能量反射率微乎其微, 可以认为是因仪器精度有限导致的误差, 不违背 Brewster 定律。

在此位置上, 进一步绕 y 轴转动 A, 此时入射角 i 发生了变化, 偏离了 Brewster 角 i_B . 观察反射、透射光强, 有如下现象:

1. 入射角 i 偏离 i_B 愈显著, 反射光愈强; 尤其在掠入射 ($i \rightarrow 90^\circ$) 时, 反射光达到最强, 几乎不可见透射光;
2. 同样, 透射光强的变化趋势与反射光强变化趋势恰好相反。

这同样与 Brewster 定律一致。更精细的描述需要用到 Fresnel 公式; 事实上, 此时对 A 来说, 入射光全为 p 波成分, 有 p 波振幅反射率:

$$r_p = \frac{n \cos i - \cos r}{n \cos i + \cos r} = \frac{\tan(i - r)}{\tan(i + r)} \quad (1)$$

其中 r 为折射角, n 为介质相对空气的折射率。结合 $n \sin r = \sin i$, 可作出光强反射率 $|r_p|^2$ 对 i 的依赖关系示意图; 由图可见, 实验现象与理论吻合。

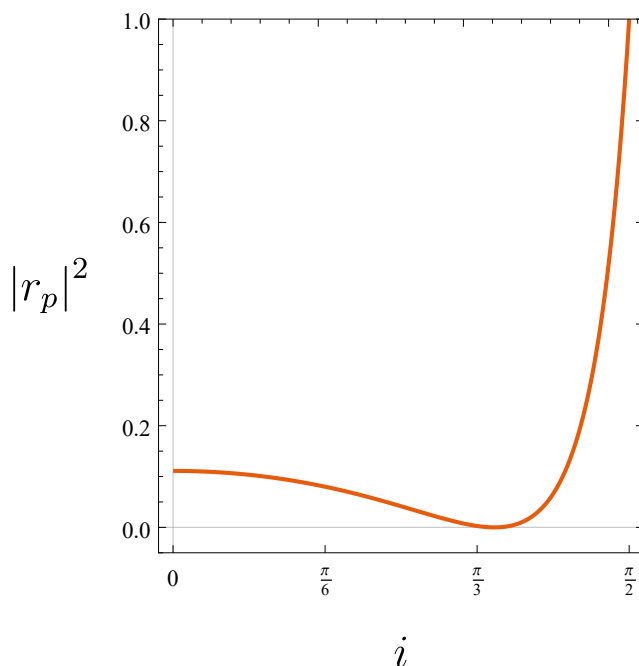


图 2: 光疏到光密介质的反射率变化规律
取 $n = 2$ 计算得到



1.2 晶体的双折射现象

当自然光沿非光轴方向入射到单轴晶体上时, 晶体内出现两束折射光。其中一束满足 Snell 折射定律, 此即 o 光; 另一束不满足 Snell 定律, 此即 e 光。

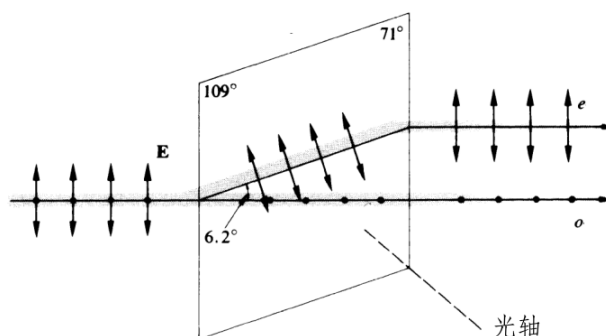


图 3: 方解石的双折射光路示意图

实际观察, 可见如下现象:

1. 透过方解石截面看下方光点, 可见两像; 转动晶体, 其中一个不动, 另一绕之转动;
2. 加上偏振片观察, 相对晶体转动偏振片, 两光点的亮暗均会变化, 变化规律相反; 在一定角度上只能看见其中一个光点, 此时旋转偏振片, 原可见光点亮度逐渐减弱, 原不可见光点亮度逐渐增大; 至 90° 处原不可见光点达到最亮, 原可见光点消失不见。
3. 透过方解石的磨面观察, 则只可见一个光点, 不随晶体转动而变动;

由实验现象总结可知, 方解石中的两束光分开传播, 且均为线偏光, 偏振方向正交; 寻常光 (o 光) 不随晶体转动而变化, 非寻常光 (e 光) 的传播方向则跟随晶体发生转动。这与图示所描述的光路一致。

透过磨面观察时, 光线沿光轴传播, 从而没有双折射现象。

2 波晶片对偏振光的影响

2.1 $\lambda/2$ 波晶片变换线偏光的偏振方向

利用起偏、检偏器 P、A 构成如下光路, 在其中加入波晶片 C 观察透射光现象。取 C 为 $\lambda/2$ 波晶片, 记录现象如下:

1. 首先不加入 C, 旋转 A, 记转角为 θ , 可见光强按照 $\cos^2 \theta$ 规律变化, 转一圈出现两次消光, 这是典型的线偏光特征, 与 Malus 定律一致。



2. 将 P 转至刻度为 $\theta = 0^\circ$ 处, 定义此时 P 的透振方向为竖直方向; 转 A 达到消光, 此时粗测 A 的刻度 $\theta'_0 \approx 23^\circ$. 加入 $\lambda/2$ 片, 将之转动一圈, 出现 4 次消光。
3. 固定 $\lambda/2$ 片而转动 A, 则只见 2 次消光。

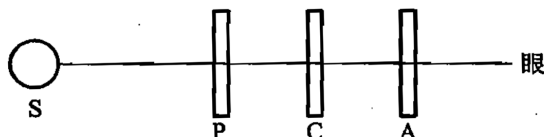


图 4: 观察波晶片透射光的偏振情况

可见, 透过 $\lambda/2$ 片的光线依然是线偏振的, 但是其入射、出射光偏振方向发生了变化。记 $\lambda/2$ 片转角为 α , $\lambda/2$ 片在入射光的 o, e 分量中引入了 π 的相差, 从而导致偏振方向由相对光轴的 $-\alpha$ 变为 $+\alpha$, 转过了 2α 角度。透过检偏器的光强按:

$$I \propto \sin^2 2\alpha$$

规律变化, 因此出现 4 次消光, 与实验现象吻合。

进一步定量检验上述规律。将 $\lambda/2$ 转到消光位置固定, 转动 P 改变 θ , 在反方向转动 A 使消光, 记录 A 转过的角度 (负数):

$$\Delta\theta' \equiv \theta' - \theta'_0, \quad \text{mod } 360^\circ$$

有如下结果:

表 1: $\lambda/2$ 旋转线偏光之角度测定数据表

$\theta/^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
$\theta'/^\circ$	23	8	352	338	322	308	292
$\Delta\theta'/^\circ$	0	-15	-31	-45	-61	-75	-91

可见, 在误差允许的范围内, $\theta \cong -\Delta\theta'$, 这与上述理论分析吻合。

2.1.1 应用: 显色偏振实验

用白光源照射置于正交偏振片之间的各向异性胶纸, 可见显色偏振现象。实验如下:

1. 转动置于正交偏振片之间的胶纸使消光, 在此位置上继续将样品旋转 45° , 此时样品上由厚至薄依次出现紫——绿——黄——橙的颜色;
2. 逐步旋转检偏器, 样品显现的颜色发生渐变; 当起偏、检偏器透振方向一致 (即转过 90°) 时, 样品颜色变为黄——红——紫——蓝, 恰为前面颜色之补色。



事实上, 对旋转 45° 后的样品来说, 入射光偏振方向与 o, e 方向之夹角均为 45° . 此时, 若该层胶纸对波长 $\sim \lambda$ 的光来说恰是 $\lambda/2$ 波晶片, 则出射光也是线偏光, 偏振方向相对入射光转过 $2 \times 45^\circ = 90^\circ$, 恰能完全通过检偏器。

胶纸显示出 $\sim \lambda$ 的颜色, 说明在透过检偏器的光当中, 波长在 λ 附近的光占主要成分, 即意味着该段胶纸可视为对应的 $\lambda/2$ 波晶片。考虑相邻段胶纸的颜色差异, 应有:

$$\frac{\Delta\lambda}{2} \equiv \Delta L = d \Delta n$$

由此可估计胶纸厚度。然而, 此处对 Δn 没有概念, 因此未做具体计算。

2.2 $\lambda/4$ 波晶片使线偏光变化为椭圆偏光

重复与上述 $\lambda/2$ 波晶片类似的实验, 只是将光路图中的 C 替换为 $\lambda/4$ 波晶片, 有如下现象:

表 2: $\lambda/2$ 旋转线偏光之角度测定数据表

$\theta/^\circ$	A 转一圈可见现象	C 出射光偏振态
0	消光 \rightarrow 亮 \rightarrow 消光 \rightarrow 亮	线偏
15	暗 \rightarrow 亮 \rightarrow 暗 \rightarrow 亮, 无消光	椭圆偏
30	同上, 光强变化不那么显著	椭圆偏
45	光强基本恒定	圆偏
60	亮 \rightarrow 暗 \rightarrow 亮 \rightarrow 暗, 无消光	椭圆偏
75	同上, 光强变化更加显著	椭圆偏
90	亮 \rightarrow 消光 \rightarrow 亮 \rightarrow 消光	线偏

可见, 出射光是椭圆偏振光, 这是由 $\lambda/4$ 波晶片在 o, e 分量之间引入 $\frac{\pi}{2}$ 相差所导致的。当入射光恰好沿光轴时, 得到线偏光; 当入射光与波晶片 o, e 轴均夹 45° 时, 得到圆偏光。

2.2.1 应用: 椭圆偏光与部分偏振光的产生及检验

上述实验可以产生椭圆偏振光。如果只通过检偏器 A 观察, 椭圆偏光与部分偏振光有完全类似的特性; 其中, 部分偏振光是令光线按 Brewster 角入射玻璃片堆、收集透射光得到的。

由于入射光的 s 分量在玻璃片堆中一次次反射, 几乎消耗殆尽, 得到的是仅含有少量 s 成分却含有大量 p 成分的透射光, 此即部分偏振光。

可通过以下光路区分椭圆偏光与部分偏振光。

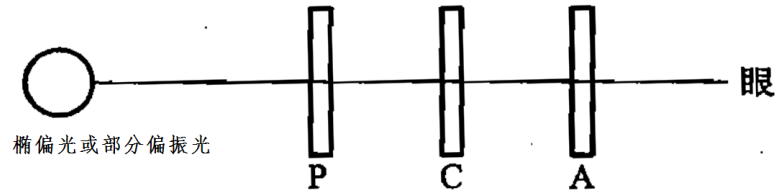


图 5: 检验椭圆偏光与部分偏振光

假定入射光为椭圆偏光, 考虑如下步骤:

1. 使光入射偏振片 P, 调整偏振片的方向使透过 P 的光强最小, 此时该偏振片的透振方向与椭圆的短轴平行;
2. 不加入 C, 只在 P 后再加一偏振片 A 使消光; 此时 A 的透振方向沿椭圆长轴;
3. 在两偏振片间加入 $\lambda/4$ 片 C, 调整使消光。此时, 波晶片的 o, e 方向分别对应两偏振片的透振方向, 进而对应椭圆的长短轴; 也就是说, 若以 o, e 方向为坐标轴, 该椭圆偏光光矢量的变化轨迹为正椭圆;
4. 移走 P, 让椭圆偏光直接通过 C, 应当得到线偏光。此时调整 E, 可以完全消光。

对部分偏振光重复上述步骤, 则并不能完全消光 (部分偏振光通过 $\lambda/4$ 片并不能得到线偏光), 由此便将椭圆偏光与部分偏振光区分开了。