

旋光晶体特性的观察与解释

2020.12.8 刘佩尧、安南、董建宇

[摘要]: 晶体是一类具有有明确衍射图案的固体。由于衍射图案的周期性，可以推断其内部具有周期性规律的结构。这种周期性的结构会使得晶体具有许多特殊的性质。在光学中，晶体的性质表现有双折射、旋光性等，这些现象归根到底都是由于晶体中折射率并非各向同性造成的。本实验将以旋光晶体为切入点，对晶体的一些光学特性所造成的实验现象进行初步的观察和解释。

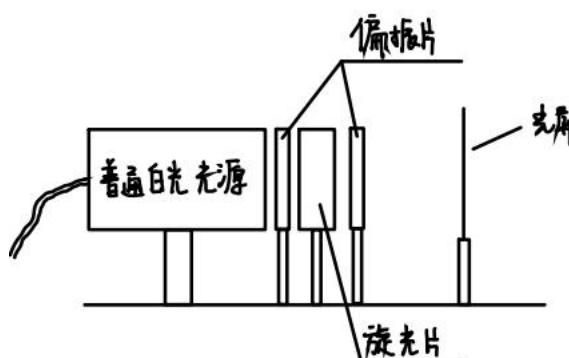
1、实验器材与目的

在光学实验室可用的光学晶体有旋光晶体、偏振片、 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片，光源有普通白色光源、红色激光，光学器件有凸透镜等。其中旋光晶体、 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片本质上是相同的晶体，仅在厚度、切片方式上有所差别。经过考虑，决定采用旋光晶体进行实验。另外为了更加精细的探究晶体的性质，将会考虑光线斜入射时的产生的一些现象。

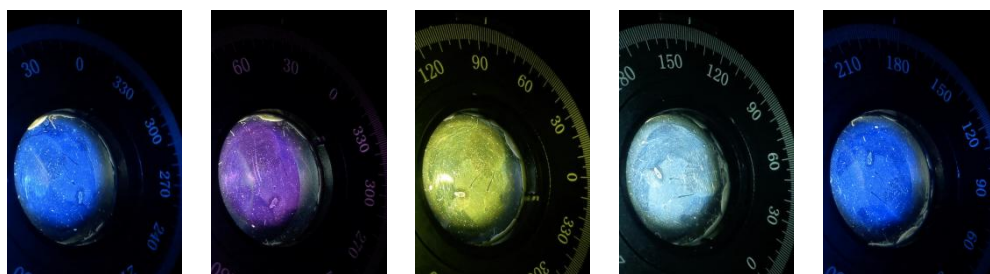
2、实验设计与现象

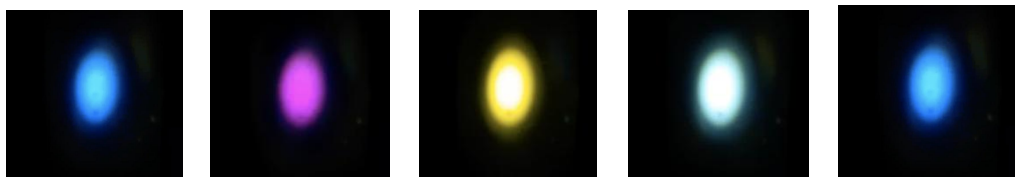
2.1 实验现象:

首先探究旋光晶体正入射时对不同波长光的旋光性质。光路搭建如下图所示。

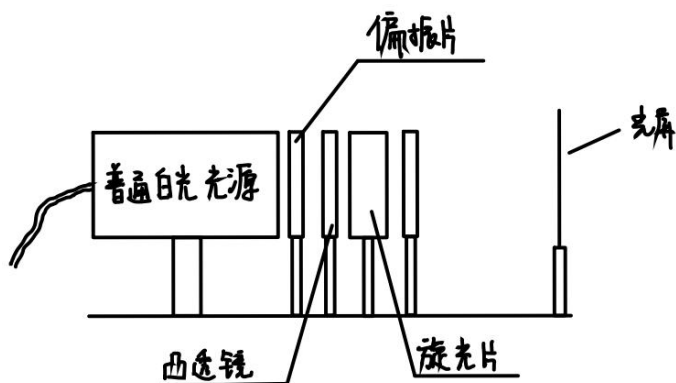


实验现象如下(另外一波片始终为 0 度, 下同):当检偏器旋转到不同角度时, 出现不同颜色, 第一行图片为手机直接沿光路拍摄; 第二行为光屏上颜色呈现。

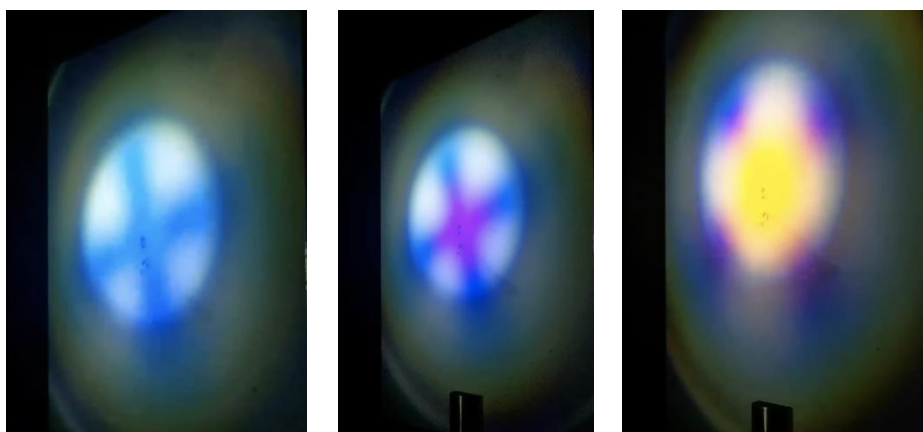




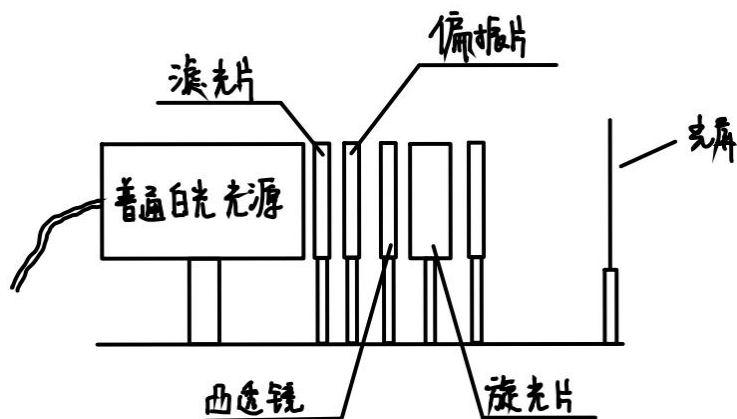
根据这些现象可以测定晶体的旋光系数。为扭曲光路，加入一凸透镜，光路如下：



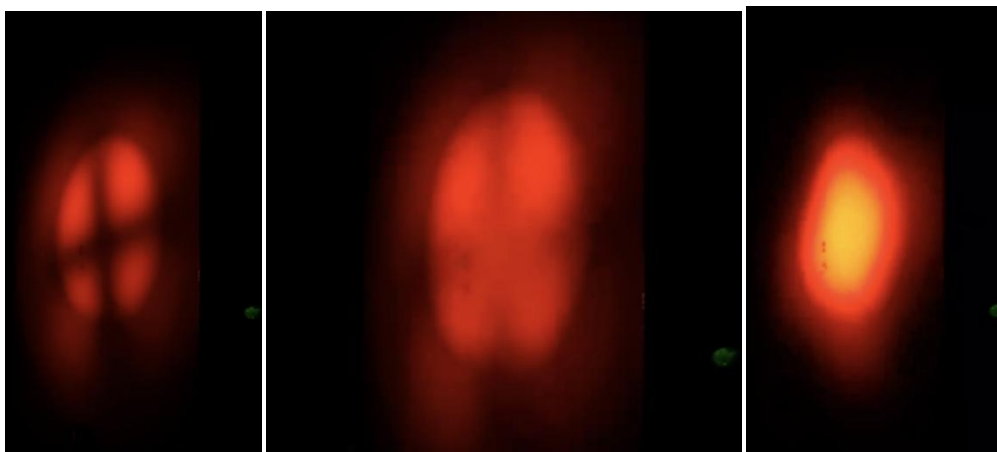
实验现象如下：出现彩色图像，且只随着起偏器与检偏器的旋转发生变化。



加入红色滤光片，实验光路图如下：



实验现象如下：光屏上出现如下图暗十字，且检偏器每旋转 180 度暗十字重新出现，并且图形同方向旋转 90 度。



2.2 定量探究:

利用滤光片测定晶体对红光和蓝光的旋光系数。实验数据如下:

颜色	旋光前 1	旋光后 1	旋光前 2	旋光后 2
红光	0/126	0/184.5	0/125	0/185
蓝光	0/128	0/64	0/126	0/64.9

数据格式: 消光时两偏振片的读数 第一个偏振片的度数/第二个偏振片的度数

红光旋光度: 59.25 度; 蓝光旋光度: -62.55 度。

3、实验现象的解释

3.1 对于正入射时旋转偏振片产生彩色的解释:

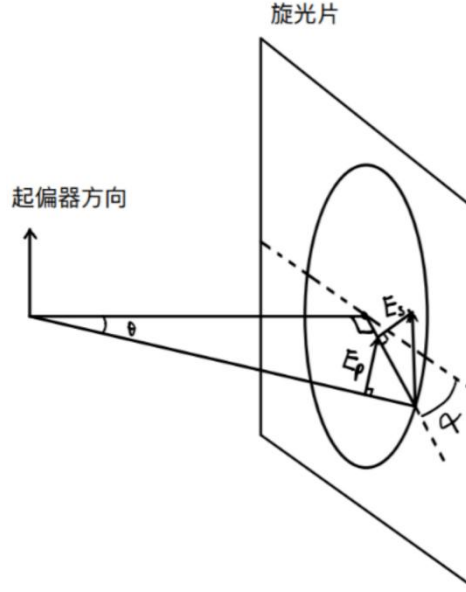
出现彩色的原因是旋光晶体对不同波长的光旋光系数不同, 因而不同波长的线偏振光经过旋光晶体后转过的角度不同, 旋转偏振片, 将对不同波长的光消光, 因而显示出该光的补色。石英的旋光率与波长的关系如下:

波长/nm	794.76	728.1	656.2	546.1	430.7	382.0
旋光率	11.589	13.924	17.318	25.538	42.604	55.625

3.2 对于暗十字的理论解释:

光源发出的不是严格的平行光, 具有一定的发散性, 这也是为什么经凸透镜不会汇聚成一点 而能够成像, 像的中心对应平行光, 周围对应发散光。

光线经起偏器后变为线偏振光, 在空气, 旋光晶体间发生折射时, 根据菲涅尔折射公式, 垂直、平行入射面的偏振分量大小发生变化, 而相位不变, 因此仍是线偏振光, 但偏振方向转过一定角度。对于不同方向的发散光, 其偏振相对于入射面的方向不同, 因此偏振方向的变化也不同, 导致了与光轴夹角相同, 方向不同的发散光有的能通过检偏器, 有的不能, 旋转 对称性丧失, 因此出现暗十字。



如图所示,斜入射光线经过起偏器后的偏振方向由起偏器的方向在垂直于传播方向的平面内投影所决定,该偏振方向又分解为垂直于入射面方向与平行于入射面方向,最大值分别为 E_s 和 E_p 。

$$E_s = E \cdot \cos(\alpha) \quad E_p = E \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

折射过程中入射角为 θ , 折射角为 θ_2 , 由折射定律得: $\sin(\theta) = n \cdot \sin(\theta_2)$

$$\text{由菲涅尔折射定律, 折射后有: } E_{p2} = \frac{2\cos(\theta)}{n\cos(\theta) + \cos(\theta_2)} E_p, E_{s2} = \frac{2\cos(\theta)\sin(\theta_2)}{\sin(\theta + \theta_2)} E_s$$

$$E_2 = (E_{s2}^2 + E_{p2}^2)^{1/2}$$

所以偏振片方向转过: $\delta_1 = \arctan\left(\frac{E_{s2}}{E_{p2}}\right) - \arctan\left(\frac{E_s}{E_p}\right)$, 角度 δ_1 沿光线传播方向

假设光线经过旋光片仍是线偏振光。由于旋光晶体的对称性, 假设与光轴夹角为 θ 的光线在旋光片内偏振方向都转过 δ_2 。

$$\text{设 } \beta = \arctan\left(\frac{E_{s2}}{E_{p2}}\right)$$

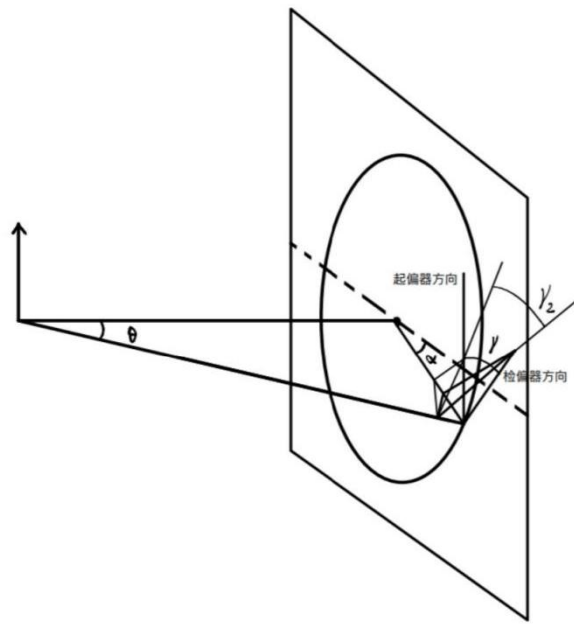
$$\text{在出射前 } E_{s3} = E_2 \cdot \sin(\beta + \delta_2), E_{p3} = E_2 \cdot \cos(\beta + \delta_2)$$

折射过程中入射角为 θ_2 , 出射角为 θ

$$\text{由菲涅尔折射定律, 折射后 } E_{s4} = \frac{2\cos(\theta_2)\sin(\theta)}{\sin(\theta + \theta_2)} \cdot E_{s3}, E_{p4} = \frac{2n\cos(\theta_2)}{\cos(\theta_2) + n\cos(\theta)} E_{p3}$$

$$\text{因此转过角度 } \delta_3 = \arctan\left(\frac{E_{s4}}{E_{p4}}\right) - \arctan\left(\frac{E_{s3}}{E_{p3}}\right)$$

$$\text{偏振方向转过总角度为 } \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$



设检偏器的偏振方向相对起偏器转过 γ ，则其在垂直于光线传播平面内投影相对于起偏器转

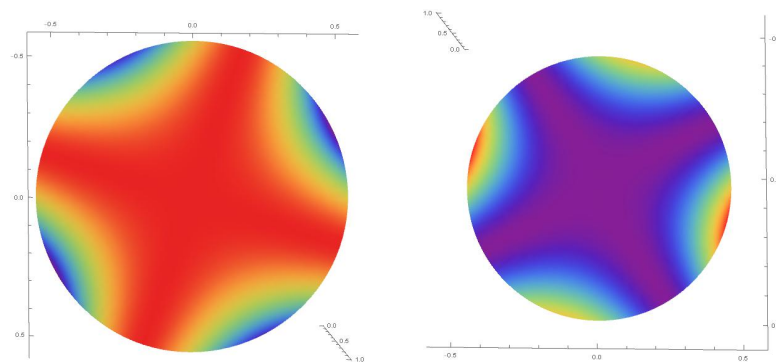
过 $\gamma_2 = \arctan\left(\frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\sin(\alpha - \gamma) \cdot \cos\theta}\right) - \arctan\left(\frac{\cos\alpha}{\sin\alpha \cdot \cos\theta}\right)$ 如上图

因此出射光的强度为: $I = I_0 * (\cos(\delta - \gamma))^2$

3.3 通过数值计算再现实验现象

根据上述理论解释通过数值计算的方式，再现出了观察到的实验现象:

下图为根据上述对实验现象的理论解释在进行数值模拟绘制的图片



竖直方向为第一个偏振片偏振方向

左图旋光度为 60 度；第二个偏振片偏振方向相对于第一个偏振片偏振方向旋转 60 度

右图旋光度为 60 度；第二个偏振片偏振方向相对于第一个偏振片偏振方向旋转 150 度
图案整体转过 45 度。

4、实验结论

目前可以确定的是，十字的出现所代表的不对称性产生的原因应当有光在晶体表面斜入射时遵循的菲涅尔公式导致的偏振变化。遗憾的是，由于对晶体光学性质知识的匮乏，理论中没有考虑 L 光与 R 光不是圆偏振光的影响，而这对于光强的分布也应有比较大的影响。

5、参考文献

新概念物理教程. 光学/赵凯华. 北京:高等教育出版社, 2004.11

6、小组分工

刘佩尧: 暗十字现象理论分析, 数值模拟, 参与实验

安南: 彩色理论部分, 摘要, 现象文字部分, 参与实验

董建宇: 文献整合, PPT 制作, 数值模拟, 参与实验