晶体光学

实验者: 周文斌 (　　)　焦润泽 (　　)　指导老师: 李俊韬
中山大学物理学院，陆达理堂

摘　要: 本实验系统开展晶体光学性质的观测与分析研究，采用透射偏光显微镜，通过正交偏光干涉、锥光干涉、光程差补偿等方法，对 12 种不同取向、不同类型的单轴晶体样品进行了全面表征。实验完成了晶体各向异性判断、快轴方向与光程差测量、锥光干涉图观测与分类、光性正负鉴定及旋光性判断等核心内容。结果表明：所有待测各向异性晶体均表现出典型的 4 明 4 暗消光现象；采用一级红插片法完成了 6 个未知晶片的快轴方向与光程差定量测量，测量范围覆盖 100nm-320nm；观测并分类了垂直光轴、斜交光轴和平行光轴三类切片的锥光干涉图，揭示了不同取向晶体干涉图的特征与成因；对比了一级红插片法与石英楔子法在光性正负鉴定中的优劣，完成了 5 种 Z 切晶体的光性正负判定；利用埃利旋转向法成功区分了左旋与右旋石英晶体。本实验系统验证了晶体双折射、干涉与旋光的核心理论，掌握了偏光显微镜的操作与晶体光学性质的鉴定方法，为光学晶体器件的设计与应用提供了实验基础。
关键词：晶体光学; 双折射; 正交偏光干涉; 锥光干涉; 光性正负; 旋光性 -

1 引言

在晶体中，除立方晶系晶体外，都表现出光学各向异性（双折射现象）。当光经过各向异性晶体时，光的性质会随着晶体取向的不同而发生改变，并表现出各种有趣的光学现象。利用晶体的光学各向异性（双折射现象），可以制成光学偏振器、应力分析仪、电光调制器等。例如，激光器内部的激光晶体以及调 Q 使用的偏振器和调制器，调节激光波长的频率转换器，调解激光偏振态的偏振片和波片，光通信调解与解调器件中所需要的电光调制器，都是由各向异性晶体组成。而目前显示中大量使用的液晶，其光学特性也与固态的各向异性晶体类似。因此，观测和研究晶体（特别是各向异性晶体）光学性质，对我们充分认识晶体的光学性质和利用这些性质都有十分重要的意义。

2 实验目的

1. 熟悉单轴晶光学性质，晶体的消光现象，干涉色级序；
2. 了解偏光显微镜原理及掌握其使用方法；
3. 观察晶体的类别、轴向和光性正负等过程，估计晶片光程差。

3 实验原理

3.1 晶体双折射与光率体

折射率与光的传播方向和光矢振动方向有关的晶体称为各向异性晶体。除立方晶系的晶体外，所有的晶体都是各向异性晶体。如：方解石、水晶、KDP、$LiNbO_3$、$BaTiO_3$ 等都是各向异性晶体。

当光通过各向异性晶体时，会产生双折射现象，并表现出偏振性质。当光沿各向异性晶体传播时，总存在一个或两个方向不发生双折射现象，此方向称为晶体的光轴。按晶体的光轴分，各向异性晶体又可分为单轴晶和双轴晶：单轴晶只有一个光轴，如四方晶系、六方晶系、三方晶系的晶体；而双轴晶则有两个光轴，如正交晶系、单斜晶系、三斜晶系的晶体。

其中，折射率不随入射光方向而变的称为寻常光或 o 光（折射率为 n_o），折射率随入射光方向而变的称为非寻常光或 e 光（折射率为 n_e）。o 光和 e 光都是偏振光，并且它们的振动方向互相垂直：o 光的振动方向垂直于包含光轴和 o 光波法线所组成的平面，e 光的振动方向则平行于包含光轴和 e 光波法线所组成的平面。

由于光在晶体中沿不同传播方向和振动方向，其折射率不同，光波各矢量间关系较复杂，因此需要用一些图形来直观地表示出晶体中光波各矢量间的方向关系，及各传播方向对应的光速或折射率在空间的取值分布，这些几何图形称为晶体光学示性曲面。折射率椭球（或光率体）就是描述晶体光学性质最常用的晶体光学示性曲面，它是以主折射率 n_1、

n_2、n_3 为主值的椭球。在主轴坐标系，可以表示为：

$$\frac{x_1^2}{n_1^2}+\frac{x_2^2}{n_2^2}+\frac{x_3^2}{n_3^2}=1 \tag{1}$$

3.1.1 立方晶系（高级晶族）

$$n_1=n_2=n_3=n_0$$

其光率体为球体：

$$\frac{x_1^2+x_2^2+x_3^2}{n_0^2}=1 \tag{2}$$

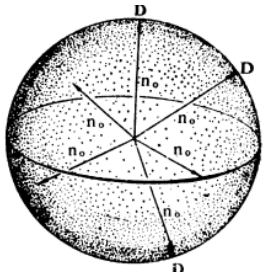


图 1: 立方晶系晶体光率体

3.1.2 单轴晶（中级晶族）

$$n_1=n_2=n_o,\quad n_3=n_e$$

其光率体为旋转椭球：

$$\frac{x_1^2+x_2^2}{n_o^2}+\frac{x_3^2}{n_e^2}=1 \tag{3}$$

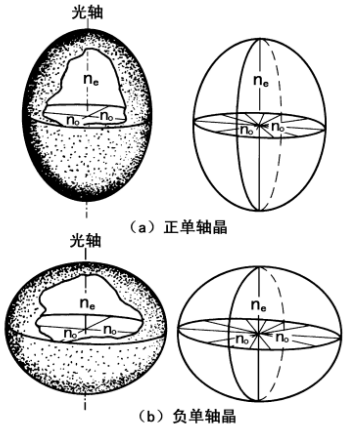


图 2: 单轴晶光率体图

单轴晶光率体的光轴（x_3 轴）必须与晶体中的主对称轴（唯一的高次轴）一致。$n_e>n_o$ 的单轴晶称为正光性单轴晶，它的光率体是沿光轴方向拉长了的旋转椭球；$n_e<n_o$ 的单轴晶称为负光性单轴晶，它的光率体是沿光轴方向压扁

了的旋转椭球。由于光速 $v = c/n$，折射率越大，其光速越慢，所以晶体中折射率最大的方向称为晶体慢轴方向，而折射率最小的方向称为晶体快轴方向。

单轴晶光率体有三种中心截面：- 圆截面：垂直光轴的圆，半径为 n_o；- 主截面：包含光轴的椭圆截面，它的一个半径为 n_o（与光轴垂直），另一个半径为 n_e（与光轴平行）；- 任意截面：是一个椭圆，截面法线 N 与光轴成 θ 角。

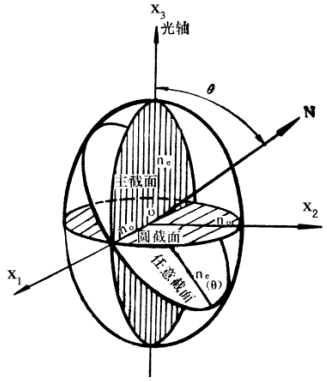


图 3: 单轴晶光率体的三种中心截面

由图可见：o 光的振动方向必垂直于主截面，e 光的振动方向则平行于主截面。

3.1.3 双轴晶（低级晶族）

$$n_1 \neq n_2 \neq n_3$$

其光率体为三轴椭球：

$$\frac{x_1^2}{n_1^2} + \frac{x_2^2}{n_2^2} + \frac{x_3^2}{n_3^2} = 1 \tag{4}$$

在低级晶族光率体轴中，可以找到两个圆截面，即存在两个光轴。双轴晶的光学性质比较复杂，本实验主要讨论单轴晶情况。

3.2 正交偏光干涉

在偏光显微镜中，当上下偏光镜的振动面互相垂直时，称为正交偏光镜。如在正交偏光镜间不放任何介质或放入各向同性晶体时，光线无法通过正交偏光镜，所以视域是黑暗的；当在正交偏光镜间放入各向异性晶体后，由于晶体双折射效应和晶片厚度、晶轴取向的不同而产生不同的干涉现象。

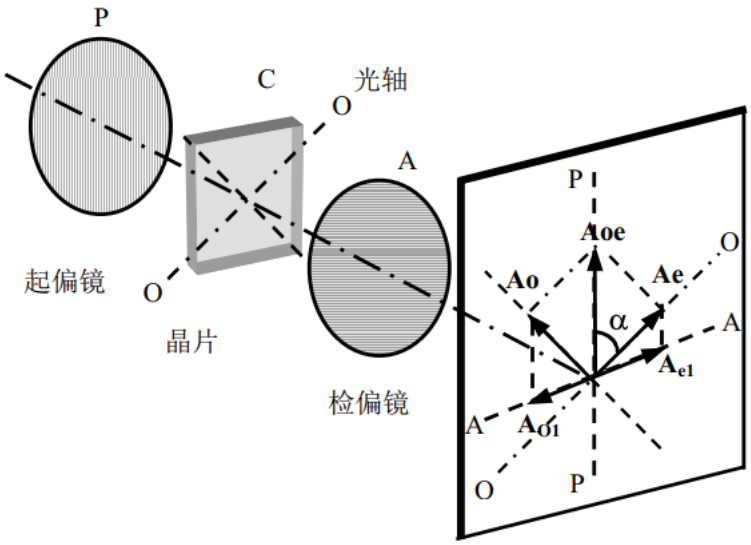


图 4: 正交偏光镜间的干涉现象

如图所示，在正交偏光镜之间加入一晶片，其中 PP 表示起偏镜（下偏光镜）的振动方向，AA 表示检偏镜（上偏光镜）的振动方向，OO 表示晶片光轴方向（OO 平行于晶片，垂直于透光方向）。如透过起偏镜的偏振光振幅为 A_{oe}，光线到达厚度为 d 的晶片后，分解成振幅分别为 A_e 和 A_o 的 e 光和 o 光，e 光和 o 光的振动方向分别平行和垂直 OO 方向，OO 与 PP 的夹角为 α，则：

$$A_e = A_{oe}\cos\alpha, \quad A_o = A_{oe}\sin\alpha$$

再经检偏镜后，A_e 和 A_o 在检偏镜 AA 方向的投影为：

$$A_{e1} = A_e\sin\alpha = A_{oe}\cos\alpha\sin\alpha, \quad A_{o1} = A_o\cos\alpha = A_{oe}\cos\alpha\sin\alpha$$

由于各向异性晶体 e 光和 o 光的折射率不同，其差值为 $\Delta n = (n_e - n_o)$，所以当它们透过厚度为 d 的晶片后，必产生光程差 $\Delta = d(n_e - n_o)$ 或位相差：

$$\delta = \frac{2\pi d(n_e - n_o)}{\lambda} \tag{5}$$

由此可见：当一束波长为 λ 的光波经正交偏光镜和晶片后，会变为大小相等而振动方向相反、频率相同、位相差恒定的两束光（e 光和 o 光），它们满足相干条件，相遇必产生干涉。根据平面波叠加原理，其合成光波振幅：

$$A_+^2 = A_{e1}^2 + A_{o1}^2 - 2A_{e1}A_{o1}\cos\delta = A_{oe}^2\sin^2 2\alpha\sin^2\left[\frac{d(n_e - n_o)}{\lambda}\pi\right] \tag{6}$$

其合成光强：

$$I \propto A_+^2 = A_{oe}^2\sin^2 2\alpha\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda}\Delta\right) \tag{7}$$

其中 d 为晶片厚度，λ 为入射波长，$\Delta = d(n_e - n_o)$ 为光程差。

由上式可以看出：正交偏光干涉光强分布状况与晶片的轴向角 α 以及光程差 Δ 有关。

3.2.1 固定光程差时的干涉现象

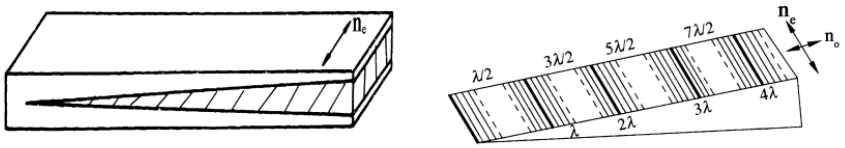
当固定光程差 Δ 时：- 当 $\alpha = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \ldots$ 时，$\sin 2\alpha = 0$，即当晶片的轴向与两正交偏光镜其中之一的偏振方向一致时，合成光强为零，视野全暗，此现象称为消光现象，此时晶片的位置称为消光位置；- 当 $\alpha = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \ldots$ 时，$\sin 2\alpha = \pm 1$，即当晶片的轴向处于两个偏光镜的偏振方向中间时，合成光强最大，视阈最亮。

很显然，如转动晶片 360°，会出现四暗、四明现象。

3.2.2 固定轴向角时的干涉现象

当固定 α，光程差 Δ 变化时，将观测到一系列现象，并能推导出晶体的部分光学性质：

1. 单色光干涉晶片的双折射率 Δn 不变，厚度 d 变化，这相当于石英楔子的情况。石英楔子是一个磨成一端薄一端厚的石英晶片，长边平行于 n_o，短边平行于 n_e，双折射率 $\Delta n = 0.009$。当正交偏光镜中插入的是石英楔子，由于石英楔子厚度不同，其不同厚度处的光程差 Δ 也不相同，所以当石英楔子由薄至厚插入时，就会看到石英楔子有规律的明暗相间的干涉条纹。



（a）石英楔子　　（b）石英楔子干涉条纹

图 5: 正交偏光下石英楔子干涉

2. 白光干涉用白光照明时，由于白光是由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七色组成，且各色光波长范围不同。对于某一个 d 值，不同色的光不可能同时达到相消或相长，干涉条纹也就不再是明暗不同的条纹，而只能是由光强不为零的各种单色光混合组合而成彩色条纹，称为干涉色。

当正交偏光镜中插入的是石英楔子，随着石英楔子厚度的变化其颜色发生有规律的变化。这种干涉色随着晶片厚度增加而出现有规律的变化，就是干涉色级序，大约每 560nm 光程差划分一个干涉色级序，通常分为四个级序，光程差越大则干涉色级序越高。每个干涉色级序中，颜色的一次明显改变称为一个色序，各色序之间颜色是连续变化的。

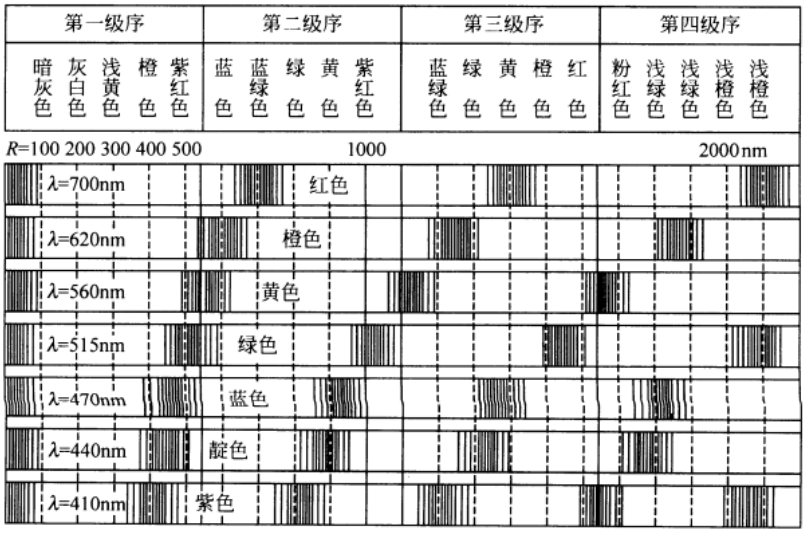
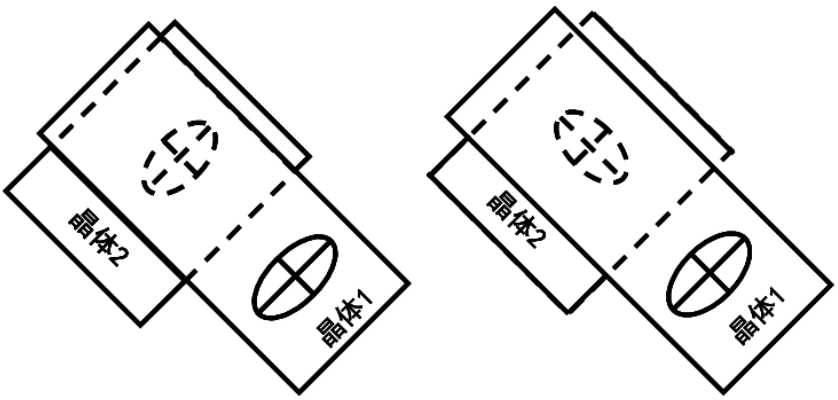


图 6: 正交偏光下的（上）干涉色级序及（下）不同波长单色光透过石英楔子产生的干涉条带。

3. 光程差补偿原理如果在正交偏光镜间放两块晶片，设光线通过晶片 1 和晶片 2 的光程差分别为 Δ_1 和 Δ_2：- 当两晶片同名轴（快慢轴）平行时，总光程差 $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$，其干涉色比原来两晶片单独放入时的干涉色都高；- 当两晶片异名轴平行时，总光程差 $\Delta = |\Delta_1 - \Delta_2|$，其干涉色比其中之一晶片单独放入时的干涉色低；- 若两晶片的光程差相等，则 $\Delta = 0$，此时两晶片的光程差互相补偿，视域全暗。

上述光程差叠加和补偿的规律称为补色法则。当两个晶片相叠成同名轴和异名轴情况时，如晶片 1 的快慢轴方向已知，可根据补色法则，利用干涉色升降情况，确定出晶片 2 的快慢轴方向，并可通过查干涉色表估算出晶片 2 的光程差。

若将晶片 1 换成石英楔子，且慢慢推入石英楔子，使 Δ_1 逐渐增加：- 如果晶片 2 与石英楔子同名轴平行，总光程差 Δ 是递增的，导致干涉色逐渐升高；- 如果晶片 2 与石英楔子异名轴平行，总光程差 Δ 是递减的，导致干涉色逐渐降低。



(a) 同名轴平行　　(b) 异名轴平行

图 7: 上下两晶片同名轴位置关系示意图

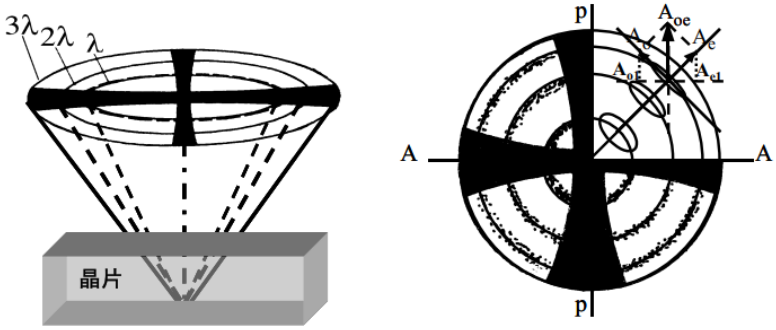
3.3 锥光干涉

消光和消色虽然能测定晶体的某些光学性质，但对于晶体的轴性、光性符号、光性方位、光轴角等根本问题，则要通过锥光观测才能最后下结论。

在正交偏光镜的条件下，在光路中加入聚光镜和勃氏镜便构成了锥光装置。聚光镜可使平行入射的偏振光高度聚敛，形成锥形偏光；勃氏镜可以得到放大了的清晰、完整的干涉图（如不加勃氏镜，必须拔出目镜，才能看到物镜焦平面上小得多的干涉图）。通过锥光装置在视域中显现的干涉图称为锥光干涉图，它不是晶片本身的像，而是锥形偏光通过晶片后到达上偏光镜所发生的干涉效应的总和。

下面根据光轴在晶体切片中方位的不同分几种情况讨论：

3.3.1 垂直光轴切片的晶体干涉



(a) 立体图　　(b) 俯视图

图 4-1-8　单轴晶体垂直光轴切片锥光于涉图

图 8: 单轴晶体垂直光轴切片锥光于涉图

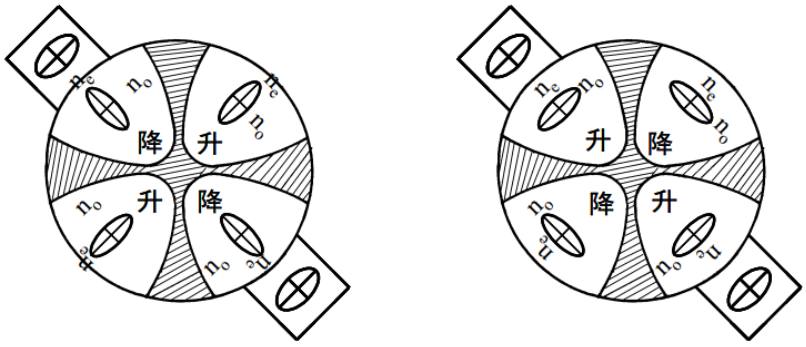
光源为单色光时，垂直光轴切片晶体的锥光干涉图由一个黑十字和亮暗相间的同心圆环组成；当光源为白光时，则同心圆环变为干涉彩环。图中十字交点为光轴的出露点，近光轴处黑臂较细，远离光轴处黑臂较粗。自光轴露点向外，等色环由疏变密，干涉色级由低到高，旋转载物台，干涉色不发生变化。

具有高双折射率的晶体所形成的干涉环，要比低双折射率晶体的多；对于同一种晶体，厚的晶片所形成的干涉环，要比薄的晶片多；此外，所使用物镜的数值孔径越高，则所观察到的干涉环也越多。

黑十字消光影的成因：在锥光干涉中，光锥中有一系列的光通过晶片，而每一条光在晶片中都有两个互相垂直的振动方向，其折射率分别为 n_o 和 n_e。包含在 PP（或 AA）面内的光与光轴组成的面是 PP（或 AA）面（即主截面），非常光是在 PP（或 AA）面内振动，而常光则在垂直 PP（或 AA）面内振动。但由于来自下偏光镜的光都是在 PP 面内振动的线偏光，所以包含在 PP 和 AA 面内的光的偏振方向都不会发生改变，都平行于下偏光镜的偏振方向，与上偏光镜的偏振方向垂直，无法通过上偏光镜，因而在视域中平行 PP 和 AA 方向就产生一个黑十字消光影。

同心干涉环的成因：当不包含在偏光镜与分析镜振动面内的光入射到晶片上时，原来平行 PP 方向的振动在晶片中要分解为两互相垂直的振动。当入射光与光轴斜交愈大时，一方面光在晶片中走过的距离愈长，另一方面双折射率愈大，所以从光锥的轴愈向外去，光程差就愈大。因为锥光是由无数光锥套在一起组成，它们共有一个锥轴，因此与光轴成某一角度的光线组成一个光锥，而同一光锥内的每一条光线均与光轴成相同的角度，通过晶片后产生相同的光程差 Δ：- 如果 $\Delta = n\lambda$（光程差为波长的整数倍），就会出现干涉相消，在视域观察到一个暗环；- 如果 $\Delta = (n + 1/2)\lambda$（光程差是光波长的奇数倍），就会出现干涉相长，在视域观察到一个亮环。

光性正负的测定：在实际晶体光学检测中，可以利用垂直光轴切片的锥光干涉图，根据光程差补偿原理，通过两种方法来检测和判断晶体光性正负：1. 插入已知快慢轴方向的晶片，观察干涉图中四个象限内干涉色序的升降，判定 n_e 是快轴还是慢轴，从而确定待测样品的光性正负；2. 插入石英楔子，观察四个象限干涉彩环的移动方向，或哪两个对称象限在靠近黑十字交点附近出现黑点：- 若一、三象限干涉色序升高，二、四象限干涉色序降低；或一、三象限干涉彩环向内收缩，二、四象限干涉彩环向外扩张；或二、四象限在靠近黑十字交点附近出现黑点，则待测样品为正光性；- 反之，则待测样品为负光性。



（a）正光性　　（b）负光性

图 9: 单轴晶体光性正负的测定

3.3.2 平行光轴切片的晶体干涉

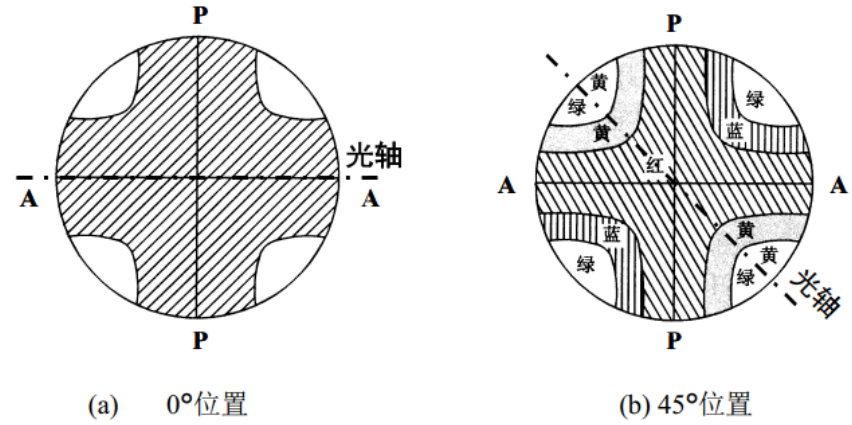


图 10: 单轴晶体平行光轴切片锥光于涉图

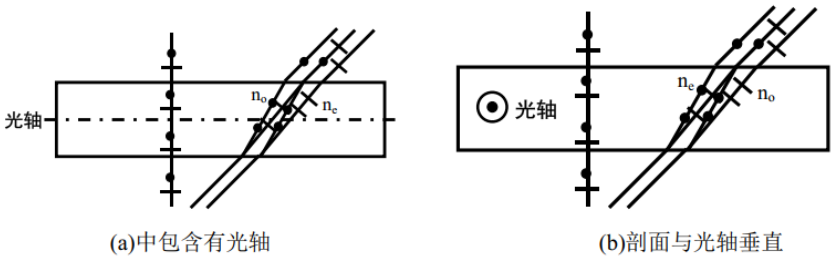


图 11: 单轴晶体平行光轴切片放大侧视图

对于平行光轴的切片：- 当光轴与上偏光镜（或下偏光镜）振动方向平行时，视域中出现模糊粗大的黑十字，只有在四象限中接近边缘有小部分明亮；此时稍微转动载物台，黑十字立即分裂成一对双曲线，并迅速地沿光轴方向离开视域，因其变化迅速，又称为瞬变干涉图；- 继续转动载物台，当光轴与上下偏光镜振动方向成 45° 角时，视域最亮，出现对称的双曲干涉带，其干涉色是由光程差 $\Delta = d(n_e - n_o)$ 所决定的。

对于双折射率较高的晶体，当处于 45° 位置时，视域中出现干涉色，在两两相对的象限中，干涉色呈对称分布：视域中央出现的干涉色与晶体在正交偏光间的干涉色完全相同；在包含光轴的二象限中，干涉色由视域中心向边缘逐渐降低；而在不包含光轴的二象限中，干涉色由视域中心向边缘逐渐升高。据此可以判断光轴的位置。

3.3.3 斜交光轴切片的晶体干涉

在实际晶片分析中，恰巧与光轴垂直的切面极为少见，大部分切面和光轴成各种角度的斜交。斜交光轴的切面在聚敛偏光间，干涉图的形态往往是不对称的：

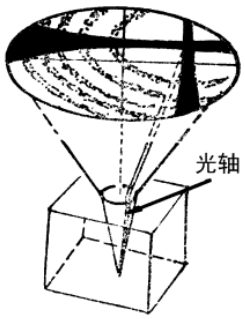


图 12: 斜交光轴切片的晶体干涉

黑十字的交点即光轴点不在视域中心，但仍在视域之内；转动载物台，光轴露点也随之转动，方向与载物台的转动方向相同，随着光轴露点的移动，消光影的位置也跟着转移，但不论怎样转移，消光影的两臂仍保持与偏光镜或分析镜的振动面相平行。

当切面与光轴斜交角度较小时，光轴出露点可能不在视野之内，此时适当旋转载物台，可观察到一条黑色条带。如果切面与光轴斜交角愈来愈小，消光影的黑臂就变弯曲起来，最后当切面与光轴平行时，就变为瞬变干涉图了。

3.3.4 波向正投影图

锥光干涉图还可以利用波向正投影图来直观解释，其核心思想是通过球面投影将三维空间中光线的振动方向映射到二维平面，清晰呈现不同光轴取向下的偏振态分布规律。

波向正投影图的作法如下：围绕单轴晶的光率体作一球体，假定将光源置于球的中心，球上的每一点都有一条光线经过，而每一条光均具有两个互相垂直的振动方向：非常光（n_e'）总是在光线与光轴所组成的主截面内振动，其投影在球面上就是一个个通过光轴出露点的大圆；常光则在与主截面（或大圆）垂直的面内振动，其投影在球面上就是一系列与光轴垂直的小圆。小圆与大圆交错布满整个球面，就像地球仪一样，大圆相当于经度圆，小圆相当于纬度圆。球面上任一光的出露点均有一大圆与一小圆与之相交，而光的振动方向分别切于小圆和大圆。

将上述投影球按照正投影的方法投影到某一平面上，即得到各种不同方向的波向正投影图，如图13所示，对应三种典型的光轴取向：

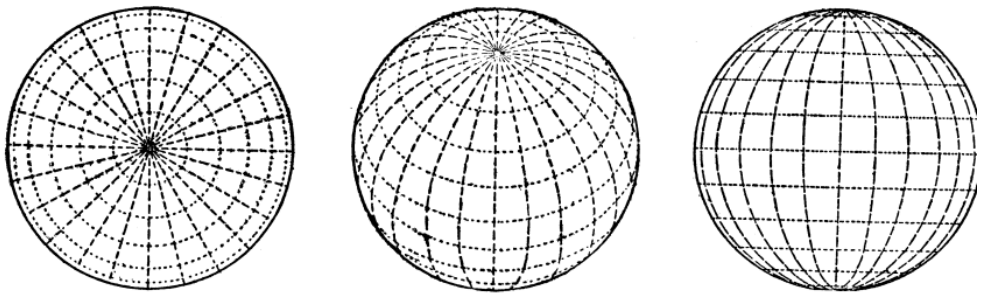


图 13: (a) 投影面垂直于光轴；(b) 投影面与光轴斜交；(c) 投影面与光轴平行

1. 投影面垂直于光轴（对应垂直光轴切片）此时光轴投影在图心上，大圆经过投影成为一条条通过光轴露点的直线，小圆是以光轴露点为中心的一个个同心圆。在每一交点上光的两个振动方向：常光总是在小圆的切线方向，非常光总是在小圆的半径方向（即经线方向）。

从图上可以清晰解释垂直光轴切片锥光干涉图的两个核心现象：- 黑十字消光影的成因：凡是包含在 PP 和 AA 面内的光，其二振动方向与上下偏光镜的振动方向完全平行，无法通过检偏镜，因此形成黑十字消光影；- 等色曲线密度分布的成因：在球面上，小圆与小圆之间是等间隔的，每一小圆都是等光程差曲线。在投影图上，小圆与小圆之间所代表的光程差间隔彼此相等，但由于愈近光轴的小圆光程差愈小，所以愈近光轴的小圆间距愈大，因此在平面图上看起来，愈到视域边缘，等光程差的间隔变得愈短，等色曲线也就愈密。

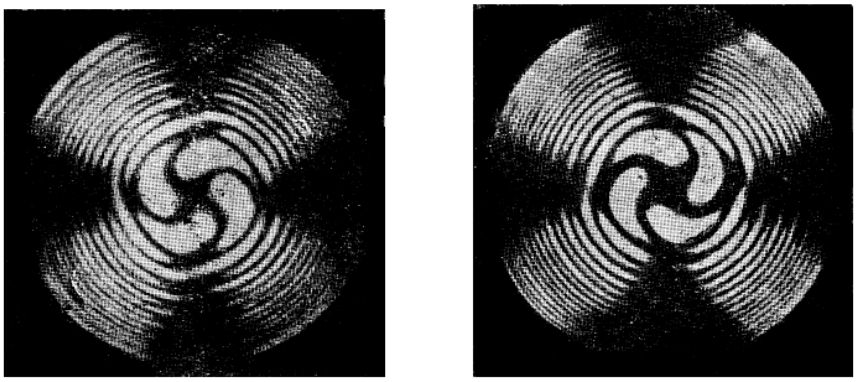
2. 投影面与光轴斜交（对应斜交光轴切片）此时光轴出露点不在视域中心，大圆和小圆的投影均发生畸变，形成不对称的分布形态，完美解释了斜交光轴切片的歪心光轴干涉图：黑十字交点（光轴出露点）偏离视域中心，转动载物台时，光轴出露点绕视域中心旋转，消光影两臂始终保持与偏光镜振动方向平行。

3. 投影面与光轴平行（对应平行光轴切片）当光轴平行于上下偏光镜时，光锥中绝大部分的光，其二振动方向差不多与上下偏光镜振动方向平行，仅在四象限接近边缘部分，振动方向与上下偏光镜的振动面成显著斜交，这就解释了为何当光轴处于零度位置时会出现一个粗大模糊的黑十字。

当载物台顺时针方向少许转动时，视域中心立即明亮起来，此时二、四两象限整个儿是明亮的，而一、三两象限的绝大部分却是消光的，因此看起来像黑十字破裂了，成为两个粗大模糊的双曲线留在一、三两象限中，这两个象限就是包含光轴的象限。继续转动载物台到 45° 位置时，图上各处的振动方向均和上下偏光镜振动方向斜交 45°，瞬变干涉图也就呈现一片明亮。

3.4 晶体旋光性与埃利旋

当一束线偏振光通过某些物质后，光的振动方向会随着在物质中的传播距离增加而逐渐发生旋转，这种现象称为旋光现象。具有旋光性的物质，称为旋光物质。在实际中，很多物质都是具有旋光性，如：石英和有机物糖类、氨基酸等。旋光有左右旋之分，因此旋光物质也有左旋物质和右旋物质之分。



（a）右旋石英在左旋石英之下；　（b）左旋石英在右旋石英之下。

图 14: 埃利旋

对于旋光物质而言，振动面旋转的角度 Ψ 与通过旋光物质厚度 d 成正比，即：

$$\Psi = \alpha d \tag{8}$$

其中，比例系数 α 称为该旋光物质的旋光率，它是一个与入射光波长有关的量。

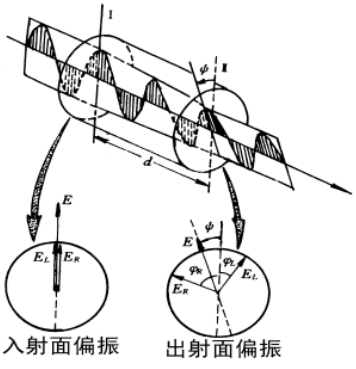


图 15: 旋光性原理示意图

菲涅耳对物质的旋光性作出了合理解释：他认为任一线偏振光都可看作是由两个振幅相等、沿同一方向传播的左旋和右旋圆偏振光组合而成。如组成线偏光的左旋与右旋圆偏光的折射率分别用 n_L 和 n_R，光波长用 λ，通过晶体厚度用 d 表示，在两圆偏光自晶片透出的瞬间，二者各具有一定周相，二等分其周相差，就得到离开晶片后的平面偏光的振动方向，此振动方向比原来进入晶片前时的振动方向转动了一个角度 Ψ：

$$\Psi = \frac{\varphi_L - \varphi_R}{2} = \frac{\pi d(n_L - n_R)}{\lambda} \tag{9}$$

由上式可以看出：- 当 $n_L = n_R$ 时，$\Psi = 0$，不存在旋光；- 当 $n_L > n_R$ 时，$\Psi > 0$，为右旋；- 当 $n_L < n_R$ 时，$\Psi < 0$，为左旋。

当光的波长愈短，晶片的厚度愈大和两圆偏光的双折射率愈大时，偏光面转动的程度愈大；反之，偏光面的转动愈小。由于两圆偏光的双折射率远较晶体的正常双折射率为小，因此只有在垂直光轴的切面中而且厚度较大时，才能见到较显著的偏光面转动现象。

埃利旋：如果将相当厚度的右旋与左旋石英晶片叠置在一起，在聚敛光中可以看到特殊旋转干涉图，其形状如“卍”或“卐”，其四臂或是右旋或是左旋，主要决定于是哪一晶片放在下面。利用埃利旋可以在晶片中识别由左旋和右旋两种石英单体所构成的双晶。

4 实验内容与步骤

1. 仔细阅读教材，了解偏光显微镜的结构及使用方法。本实验内容暂且只使用透射工作方式。实验中宜先用目镜观测，然后再使用电脑连接相机拍照片和录像。

2. 选用低倍物镜（10X），检查显微镜中心是否已校正好。如果发现尚未校正好，可请老师来处理，切勿自行调节。

3. 调整上下偏光镜正交。观测并判断几个晶片（A,B,C 片；x 切白云母、x 切方解石、x 切薄石英、x 切 LN）是各向同性还是各向异性。分析讨论为何各向异性晶体在转动载物台时会出现 4 次消光现象。

4. 对实验室提供的 A、B 晶片，用一级红插片判断其快轴方向（快轴与样品长边的夹角）和光程差。要分析判别的依据，快轴方向用示意图体现。

5. 拓展：对实验室提供的 4 种各向异性晶片（样品分别标记为 I1、II1、III1、IV1），用一级红插片判别其快轴方向，并估计其光程差。

6. 进行锥光干涉实验。换上高倍物镜（如 40X），调整至正交偏光干涉状态，加入勃氏镜，以满足锥光干涉的试验条件；放置样品，旋转载物台，仔细观察不同角度下的晶体切片锥光干涉图；对以下样品都进行观察和记录，找出这些干涉图的相同点和不同点（若因错误操作导致样品损坏，将影响实验成绩）：

   (a) Z 切晶片：包括 Z 切铌酸锂（LN）、Z 切 Al_2O_3、Z 切薄石英晶片、二氧化碲（TeO_2）和 Z 切厚石英切片（大方、小圆）；

   (b) 斜切晶片：包括斜切薄 LN，斜切的厚 LN，斜切的 TeO_2；

   (c) 平行轴切晶片：包括白云母、x 切石英。

7. 鉴定光性正负：分别使用石英楔子和一级红插片来判定所有 Z 切晶片（Z 切厚石英切片除外）的光性正负。理解并掌握两种判定方法的基本原理，简要给出两种方法的判断依据和判断结果。

8. 利用观察埃利旋转向的方法，判断厚石英（大方和小圆），以及 Z 切薄石英片的旋光性质（左旋或右旋）。

9. 实验拓展：选取标本样品（至少 2 块），分别用偏光显微和锥光干涉方法观测并记录图像。

10. 放置好样品，清理好桌面，将显微镜光源的亮度调到最小后再断开电源开关，并且关闭电脑。在设备使用登记表上记录使用情况，让老师检查后方可离开。

5 实验数据处理与结果分析

5.1 调整偏光镜与观察晶体

首先我们固定检偏器两 0 刻度线对齐，调整起偏镜，反复对比找到最暗时，偏光镜正交调整完成。

观测几个晶片，观察结果如表1

表 1: 观察并判断几个晶片

	现象	异同性
A 片	4 明 4 暗	各向异性
B 片	4 明 4 暗	各向异性
C 片	一直暗	不确定
X 切白云母	4 明 4 暗	各向异性
X 切薄石英	4 明 4 暗	各向异性
X 切 LN	4 明 4 暗	各向异性

消光现象分析 根据实验原理，正交偏光镜间放入各向异性晶片后，合成光强满足：

$$I = A_{oe}^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right) \tag{10}$$

其中：

- A_{oe} 为透过起偏镜的线偏振光振幅；
- α 为晶片光轴与起偏镜振动方向的夹角；
- $\Delta = d(n_e - n_o)$ 为晶片产生的光程差；
- λ 为入射光波长。

消光现象对应合成光强 $I = 0$ 的情况，由公式可知存在两种消光机制：

- 机制 1：$\sin^2 2\alpha = 0$，即 $\alpha = 0°or90°or180°or270°$，此时晶片光轴与起偏镜或检偏镜的振动方向平行；
- 机制 2：$\sin^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right) = 0$，即光程差为波长的整数倍，对应特定厚度的晶片。

本实验中观测到的转动载物台产生的消光属于机制 1，与晶片厚度无关，是各向异性晶体的固有特性。当晶片光轴与起偏镜振动方向平行（$\alpha = 0°$）时：

- 透过起偏镜的线偏振光振动方向与晶片光轴完全一致，入射到晶体后不会发生双折射，仅激发单一偏振态的光（e 光或 o 光，取决于晶体类型）；
- 该偏振光的振动方向与检偏镜的振动方向垂直，无法通过检偏镜，因此视域全暗，出现消光。

当转动载物台使 α 偏离 0° 时：

- 线偏振光分解为振动方向互相垂直的 o 光和 e 光，二者产生固定光程差；
- 经过检偏镜后，两束光在同一振动方向上发生干涉，合成光强 $I > 0$，视域变亮。

转动载物台一周（360°），晶片光轴会依次与起偏镜、检偏镜的振动方向平行四次（对应 $\alpha = 0°or90°or180°or270°$），每次平行时都会满足 $\sin^2 2\alpha = 0$ 的消光条件，因此会出现四次消光现象。

5.2 A、B 晶片快轴方向和光程差判断

A 片 首先插入 A 片，调整消光角度，此时盘面刻度为 $0°/360°$，之后插入一级红片，测定长边角度为 318°。

1. 调整角度为 45°, 对比光谱颜色图，发现处于 470nm 左右，为异名轴
2. 调整角度为 315°, 对比光谱颜色图，发现处于 720nm 左右，为同名轴

$$\begin{cases} \Delta_1 + \Delta_2 = 720nm \\ |\Delta_1 - \Delta_2| = 470nm \end{cases} \tag{11}$$

得到：

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{(\Delta_1+\Delta_2)-|\Delta_1-\Delta_2|}{2} = 125nm \\ \theta &= 318^\circ - 315^\circ = 3^\circ\end{aligned} \tag{12}$$

用示意图表示为:

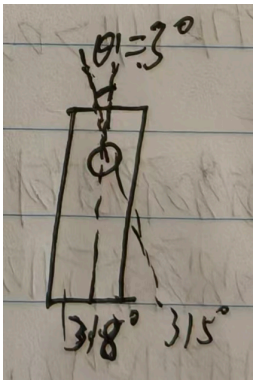


图 16: A 晶片快轴方向示意图

B 片 首先插入 B 片，调整消光角度，此时盘面刻度为 15°，之后插入一级红片，测定长边角度为 324°。

1. 调整角度为 60°, 对比光谱颜色图，发现处于 700nm 左右，为同名轴
2. 调整角度为 330°, 对比光谱颜色图，发现处于 470nm 左右，为异名轴

$$\begin{cases}\Delta_1+\Delta_2 = 700nm \\ |\Delta_1-\Delta_2| = 470nm\end{cases} \tag{13}$$

得到：

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{(\Delta_1+\Delta_2)-|\Delta_1-\Delta_2|}{2} = 115nm \\ \theta &= 180^\circ - (360^\circ - 324^\circ) + 60^\circ = 84^\circ\end{aligned} \tag{14}$$

用示意图表示为:

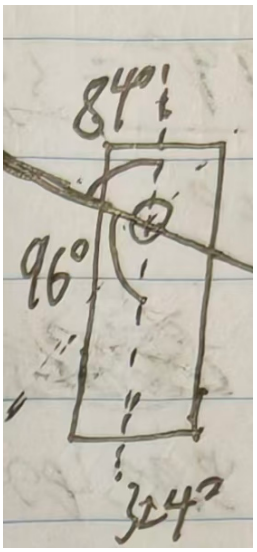


图 17: B 晶片快轴方向示意图

5.3 拓展: 其他四种晶片快轴方向和光程差判断

样品 I 首先插入 I 片，调整消光角度，此时盘面刻度为 306°，之后插入一级红片，测定长边角度为 312°。

1. 调整角度为 351°, 对比光谱颜色图，发现处于 670nm 左右，为同名轴
2. 调整角度为 261°, 对比光谱颜色图，发现处于 470nm 左右，为异名轴

$$\begin{cases} \Delta_1 + \Delta_2 = 670nm \\ |\Delta_1 - \Delta_2| = 470nm \end{cases} \tag{15}$$

得到：

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{(\Delta_1 + \Delta_2) - |\Delta_1 - \Delta_2|}{2} = 100nm \\ \theta &= 351^\circ - 312^\circ = 39^\circ \end{aligned} \tag{16}$$

用示意图表示为:

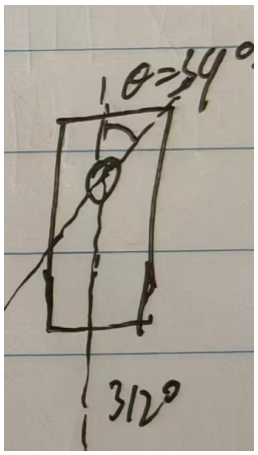


图 18: 样品 I 快轴方向示意图

样品 II 首先插入 II 片，调整消光角度，此时盘面刻度为 324°，之后插入一级红片，测定长边角度为 312°。

1. 调整角度为 9°, 对比光谱颜色图，发现处于 460nm 左右，为异名轴
2. 调整角度为 279°, 对比光谱颜色图，发现处于 840nm 左右，为同名轴

$$\begin{cases} \Delta_1 + \Delta_2 = 840nm \\ |\Delta_1 - \Delta_2| = 460nm \end{cases} \tag{17}$$

得到：

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{(\Delta_1 + \Delta_2) - |\Delta_1 - \Delta_2|}{2} = 190nm \\ \theta &= 312^\circ - 279^\circ = 33^\circ \end{aligned} \tag{18}$$

用示意图表示为:

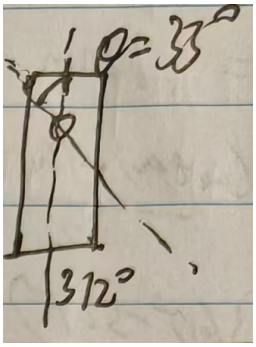


图 19: 样品 II 快轴方向示意图

样品 III 首先插入 III 片，调整消光角度，此时盘面刻度为 331°，之后插入一级红片，测定长边角度为 323°。

1. 调整角度为 16°, 对比光谱颜色图，发现处于 890nm 左右，为同名轴
2. 调整角度为 286°, 对比光谱颜色图，发现处于 250nm 左右，为异名轴

$$\begin{cases} \Delta_1 + \Delta_2 = 890nm \\ |\Delta_1 - \Delta_2| = 250nm \end{cases} \tag{19}$$

得到：

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{(\Delta_1 + \Delta_2) - |\Delta_1 - \Delta_2|}{2} = 320nm \\ \theta &= 16^\circ + (360^\circ - 323^\circ) = 53^\circ \end{aligned} \tag{20}$$

用示意图表示为:

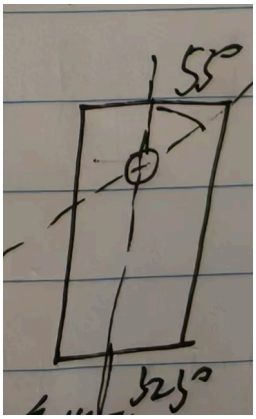


图 20: 样品 III 快轴方向示意图

但是转动一圈发现只有红色、黄色、肉色到黄绿色的变化，没有出现中间 $300nm - 500nm$ 和 $600nm - 800nm$ 的中间颜色出现。

样品 IV 首先插入 IV 片，调整消光角度，此时盘面刻度为 348°，之后插入一级红片，测定长边角度为 324°。

1. 调整角度为 33°, 对比光谱颜色图，发现处于 200nm 左右的肉色
2. 调整角度为 303°, 对比光谱颜色图，发现处于 400nm 左右的亮黄色
3. 消光时正常出现 560nm 左右的红光无法半段同/异名轴

存在 4 明 4 暗，但有两个暗处没有另外两个那么暗，发现完全无法出现蓝绿色。

结果分析 本次拓展实验对 4 种未知各向异性晶片进行了快轴方向与光程差的定量测量，所有样品均表现出典型的 4 明 4 暗消光现象，验证了其双折射特性。实验采用一级红插片法（固定光程差 560nm 补偿）完成了 3 个样品的参数测定，1 个样品因特殊光学特性出现测量异常，具体分析如下：

5.3.1 正常样品（I、II、III）结果分析

1. 测量方法的有效性验证三个样品的光程差测量结果分别为 100nm、190nm 和 320nm，均处于 0-560nm 的一级干涉色范围内，完全符合一级红插片法的适用条件。实验严格遵循补色法则：当晶片与插片同名轴平行时总光程差相加，干涉色升高；异名轴平行时总光程差相减，干涉色降低。通过联立同名轴与异名轴的光程差方程求解样品光程差，方法科学可靠，计算过程准确。

2. 光程差与干涉色的对应性测量得到的光程差与实验观测到的干涉色高度吻合：

- 样品 I 光程差 100nm，对应一级暗灰色干涉色；
- 样品 II 光程差 190nm，对应一级灰白色干涉色；
- 样品 III 光程差 320nm，对应一级黄白色干涉色。三者均与标准白光干涉色表一致，验证了实验数据的准确性。

3. 快轴方向的合理性三个样品的快轴与长边夹角分别为 39°、33° 和 53°，均在 0°-90° 的合理范围内。快轴方向的确定基于消光位置与插片光轴的相对关系，测量结果可直接用于后续光学器件的设计与应用。

4. 样品 III 特殊现象解释样品 III 转动载物台时仅观察到红色、黄色、肉色到黄绿色的变化，未出现 300nm-500nm 和 600nm-800nm 的中间颜色，该现象由其光程差特性决定：样品 III 光程差为 320nm，与一级红插片（560nm）叠加后，总光程差的变化范围为 $|560-320|=240nm$（一级灰白）到 $560+320=880nm$（二级橙黄）。由于光程差变化范围恰好跨越一级红与二级橙黄，中间的二级蓝绿色（600nm-800nm）仅在极窄的角度范围内出现，且人眼对该波段颜色的敏感度较低，因此难以清晰观测到，属于正常实验现象。

5.3.2 异常样品（IV）结果分析

样品 IV 表现出两个明显的异常现象：1. 存在 4 明 4 暗消光现象，但两个消光位置的暗度明显低于另外两个；2. 完全无法观测到蓝绿色干涉色，且消光时出现 570nm 左右的红光，无法直接判断同/异名轴。结合晶体光学原理，分析其原因如下：

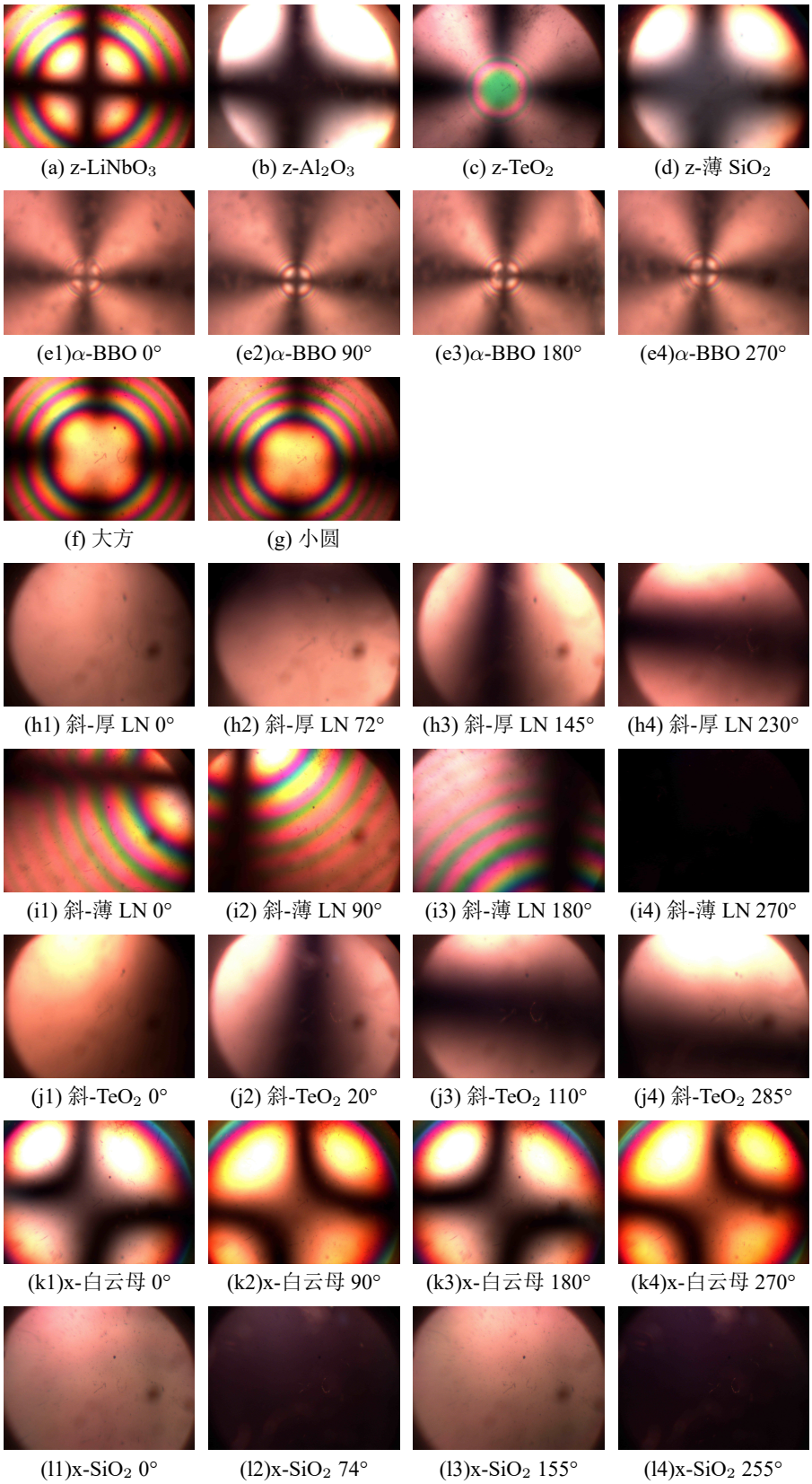
1. 消光不完全的成因消光不完全表明晶片的双折射特性存在空间不均匀性，主要可能原因有：

- 晶片存在内应力：不同区域的消光位置不一致，无法实现全视域完全消光；
- 晶片为斜切晶片：并非严格的平行光轴切片，光轴与晶片表面存在微小夹角，导致不同入射角度的光产生的光程差不同，消光效果变差；
- 上下偏光镜未完全正交：背景光强不为零，导致消光位置仍有微弱光强透过。

2. 无蓝绿色干涉色的成因无法观测到蓝绿色干涉色表明样品的光程差已超出一级红插片法的最佳适用范围：当样品光程差接近或超过 560nm（一级红）时，与一级红插片叠加后，总光程差的最小值接近 0nm，最大值超过 1120nm（二级红）。此时干涉色变化主要在一级红与二级红之间，蓝绿色（600nm-800nm）的出现范围极窄，且被高强度的红光掩盖，因此难以观测到。同时，消光时出现的 570nm 红光正是样品光程差与一级红插片光程差相互补偿的结果，表明样品光程差约为 560nm 左右。

5.4 锥光干涉实验

换上 40X 倍物镜，调整至正交偏光干涉状态，加入勃氏镜，以满足锥光干涉的试验条件；放置样品，旋转载物台，仔细观察不同角度下的晶体切片锥光干涉图，其结果如图21, 晶体旋转变化规律分析如表2



(a) z-$LiNbO_3$ (b) z-Al_2O_3 (c) z-TeO_2 (d) z-薄 SiO_2

(e1)α-BBO 0° (e2)α-BBO 90° (e3)α-BBO 180° (e4)α-BBO 270°

(f) 大方 (g) 小圆

(h1) 斜-厚 LN 0° (h2) 斜-厚 LN 72° (h3) 斜-厚 LN 145° (h4) 斜-厚 LN 230°

(i1) 斜-薄 LN 0° (i2) 斜-薄 LN 90° (i3) 斜-薄 LN 180° (i4) 斜-薄 LN 270°

(j1) 斜-TeO_2 0° (j2) 斜-TeO_2 20° (j3) 斜-TeO_2 110° (j4) 斜-TeO_2 285°

(k1)x-白云母 0° (k2)x-白云母 90° (k3)x-白云母 180° (k4)x-白云母 270°

(l1)x-SiO_2 0° (l2)x-SiO_2 74° (l3)x-SiO_2 155° (l4)x-SiO_2 255°

图 21: 锥光干涉实验观测结果图

表 2: 锥光干涉实验现象总结

组	样品名称	锥光干涉特征描述
1	z-$LiNbO_3$	中心出现“黑十字”，四周出现彩色干涉环，旋转后图样不变。
	z-SiO_2	中心出现“黑十字”，四周出现黄色干涉环，旋转后图样不变。
	z-Al_2O_3	中心出现“黑十字”，四周出现白色干涉环，旋转后图样不变。
	z-TeO_2	中心出现绿色中心彩色光斑，四周出现黑白交替的两个“十字”，旋转后图样不变
2	α-BBO	中心出现彩色干涉圆环环绕中心黑十字，四周由细的黑十字和粗的亮十字交替填满，中心随载物台转动沿圆周旋转
	大方	中心出现明亮区域，“黑十字”中心不相交，旋转载物台明亮区域中心随载物台转动沿圆周旋转
	小圆	现象与大方一致。
3	斜切薄 LN	干涉环中心在视野之外，载物台旋转时干涉环中心以相同方向沿某个圆周旋转，有着同心彩色干涉环带
	斜切厚 LN	干涉环中心在视野之外，载物台旋转时干涉环中心以相同方向沿某个圆周旋转，有着同心明暗干涉环带
	斜切 TeO_2	现象同斜切厚 LN
4	x-白云母	中心呈现明显的“黑色双曲线”，类似于“黑十字”，旋转后图样发生变化，双曲线向边缘扩张，直至视野全白，继续旋转则再次聚拢为模糊的“黑十字”，视场呈周期性变化。
	x-SiO_2	旋转 360° 出现 4 明 4 暗现象

5.4.1 各组特点及部分成因

(1) 组 1：垂直光轴（Z 切）单轴晶样品

① 共同特征：所有样品中心均呈现清晰的“黑十字”消光影，旋转载物台 360° 时，整个干涉图样保持不变。这是由于样品光轴与入射光方向严格垂直，光轴出露点始终位于视域中心，无论载物台如何转动，总有部分光线的振动方向与上下偏光镜振动方向平行，因此黑十字位置固定不变。

② 干涉环颜色差异：不同 Z 切样品的干涉环颜色存在明显区别：z-$LiNbO_3$ 呈现彩色干涉环，z-SiO_2 为黄色干涉环，z-Al_2O_3 为白色干涉环。这是由于不同晶体的双折射率大小和色散特性不同，晶体双折射率越大、厚度越厚，不同波长光的光程差差异越显著，色散现象越明显，干涉环颜色越丰富。

③ z-TeO_2 特殊现象：z-TeO_2 出现绿色中心彩色光斑，且四周存在黑白交替的两个“十字”结构。这是由于 TeO_2 晶体具有极高的双折射率（$\Delta n \approx 0.16$），同时存在微弱的旋光性，使得中心消光区域发生分裂，形成双重十字干涉结构。

(2) 组 2：具有旋光性的垂直光轴切片样品

① 共同特征：中心“黑十字”不再完整相交，而是呈现分裂状态，中心出现明亮区域；旋转载物台时，中心明亮区域会随载物台以相同方向沿圆周旋转。这是由于本组样品（α-BBO、石英）均具有显著的旋光性，线偏振光通过晶体中心时振动方向发生旋转，不再与检偏器垂直，因此中心无法形成完全消光的黑十字交点。

② 差异特征：α-BBO 样品除中心分裂的黑十字外，四周还存在细黑十字与粗亮十字交替的结构，并伴有彩色干涉圆环；而大方、小圆石英样品仅表现为中心明亮区域的旋转，干涉环相对不明显。这是由于 α-BBO 的双折射率远大于石英，相同厚度下产生的光程差更大，干涉级次更高，因此干涉环和十字结构更加丰富。

(3) 组 3：斜交光轴切片样品

① 共同特征：干涉环中心（光轴出露点）位于视域之外，旋转载物台时，干涉环中心会以相同方向沿某个圆周轨迹旋转，视域内始终可见部分同心干涉环带。这是由于样品光轴与入射光方向存在一定夹角，光轴出露点偏离视域中心；当载物台旋转时，光轴在空间中画出一个圆锥面，其在视域平面的投影即为圆周运动轨迹。

② 差异特征：斜切薄 LN 呈现彩色干涉环带，而斜切厚 LN 和斜切 TeO_2 仅能观察到黑白交替的明暗干涉环带。这是由于厚样品的光程差极大，不同波长光的干涉极大和极小相互重叠，彩色条纹被平均抵消，最终仅剩下明暗相间的干涉环；同时厚样品的光吸收增强，进一步降低了彩色条纹的对比度。

(4) 组 4：平行光轴（X 切）切片样品

① x-白云母：呈现典型的瞬变干涉图特征，中心为模糊的黑色双曲线（类似不完整黑十字）；稍微转动载物台，双曲线立即分裂并迅速向边缘扩张，直至视域全白，继续旋转则再次聚拢为模糊黑十字，视场呈周期性变化。这是由于平行光轴切片的光轴位于晶片平面内，锥光中不同角度入射的光双折射率差异显著，导致干涉图对载物台转动极为敏感。

② x-SiO_2：旋转 360° 仅观察到 4 明 4 暗现象，未出现明显的锥光干涉图。这是由于该 x 切石英晶片厚度较薄，锥光条件下不同角度入射光的光程差差异过小，无法形成可分辨的干涉环和双曲线结构，仅能观察到正交偏光下的基本消光现象。

5.4.2 现象成因及分析

(1) 黑十字消光影成因在组 1、组 2、组 3 的干涉图中均出现了不同形态的黑十字，其本质成因一致：当入射光的振动方向与晶体光率体切面的长轴或短轴完全重合时，光在晶片中传播时偏振方向不发生改变，出射光的振动方向仍与起偏器平行，与检偏器垂直，因此无法通过检偏器，形成消光区域。所有满足该条件的光线在视域中连接成十字形，即黑十字消光影。

(2) 旋光性对干涉图的影响组 2 样品干涉图中黑十字中心分裂、旋转时中心亮点移动的现象，是晶体旋光性的典型表现。线偏振光通过旋光晶体时，振动方向会随传播距离发生旋转，对于垂直光轴入射的中心光线，其振动方向旋转角度最大，不再与检偏器垂直，因此中心消光消失，形成明亮区域。当载物台旋转时，晶体的旋光方向相对于偏光镜发生变化，导致中心明亮区域随之旋转。

(3) 斜切样品干涉图不对称性成因斜切样品的干涉图不对称性完全由光轴的倾斜角度决定。光轴与入射光方向的夹角越大，光轴出露点偏离视域中心越远；当夹角超过物镜的数值孔径范围时，光轴出露点完全移出视域，仅能观察到部分干涉环带。旋转载物台时，光轴出露点绕视域中心做圆周运动，带动整个干涉环带同步旋转。

(4) 干涉色环的形成与演化所有出现干涉环的样品，其干涉环均呈同心环状分布，颜色仅与到中心的距离有关，与角度无关。这是由于同一半径处的光线与光轴的夹角相同，在晶片中传播产生的光程差相同，因此干涉级次相同。随着半径增大，光线与光轴的夹角增大，光程差逐渐增加，干涉色级次逐渐升高。当样品厚度过大时，光程差超过多个波长，不同波长的干涉条纹相互重叠，彩色干涉环逐渐消失，最终变为黑白明暗环。

5.5 鉴定光性正负

使用两种方法判定光性正负

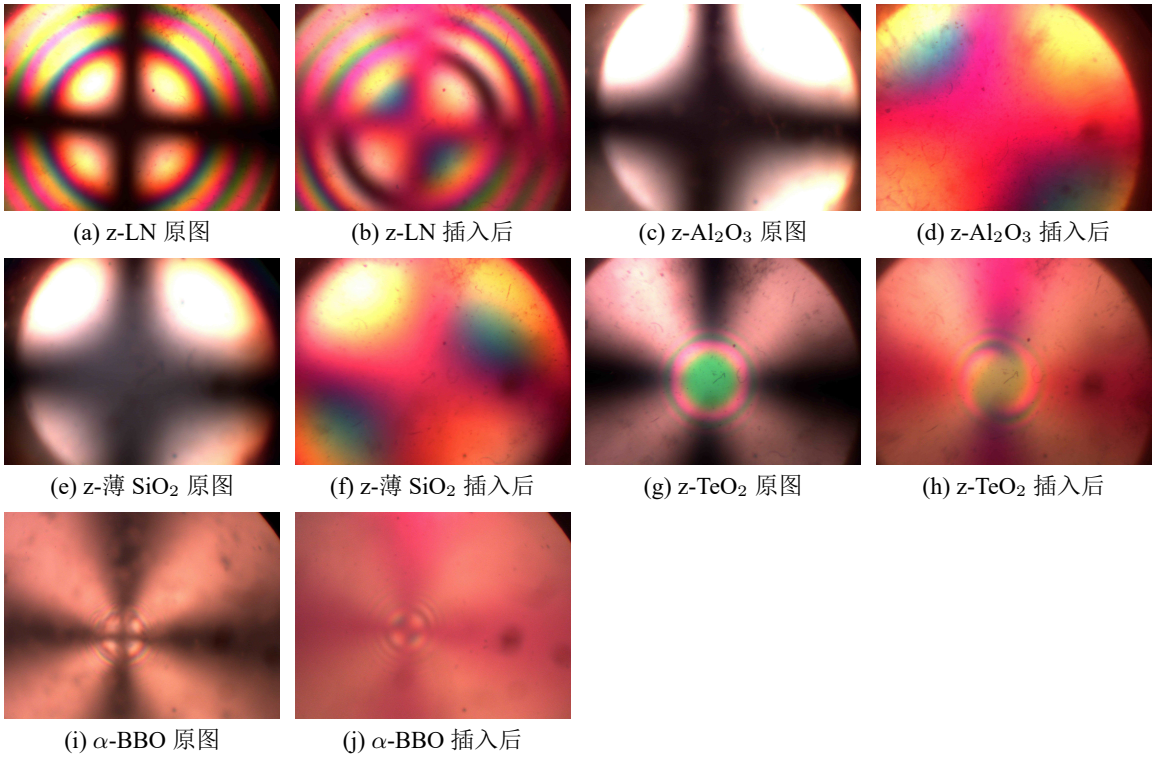
5.5.1 一级红片

首先我们利用一级红片判断光性正负，利用一三象限与二四象限的干涉色序的上升与下降判断，实验观测结果如图22所示。

判断结果如表3所示。

样品名称	色序变化	光性判断
z-LN	一三象限色序降低，二四象限色序升高	负光性
z-SiO_2	一三象限色序升高，二四象限色序降低	正光性
z-Al_2O_3	一三象限色序降低，二四象限色序升高	负光性
z-TeO_2	一三象限色序升高，二四象限色序降低 (红插片法很难分辨)	正光性
α-BBO	黑条纹变红	难以分辨

表 3: 一级红片光性判断结果



(a) z-LN 原图 (b) z-LN 插入后 (c) z-Al_2O_3 原图 (d) z-Al_2O_3 插入后

(e) z-薄 SiO_2 原图 (f) z-薄 SiO_2 插入后 (g) z-TeO_2 原图 (h) z-TeO_2 插入后

(i) α-BBO 原图 (j) α-BBO 插入后

图 22: 一级红片光性实验观测结果

我们发现红插片法对于 z-LN、z-SiO_2、z-Al_2O_3 分辨很方便且准确，而对于 z-TeO_2 分辨很难，而对 α-BBO，则完全无法分辨

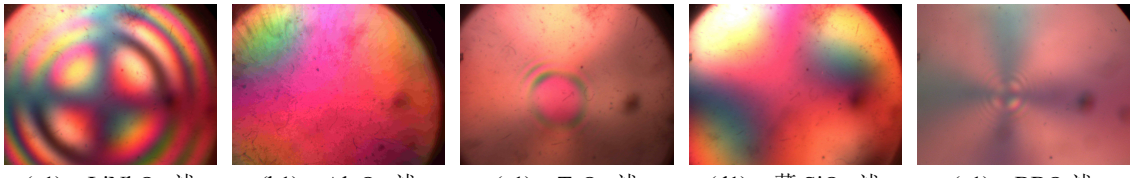
5.5.2 石英楔子

接着，我们用石英楔子对其进行判断，利用石英楔子不断插入时的干涉色环的吞吐，观察实验现象如图23所示，可以判断其光性正负结果如表4所示。

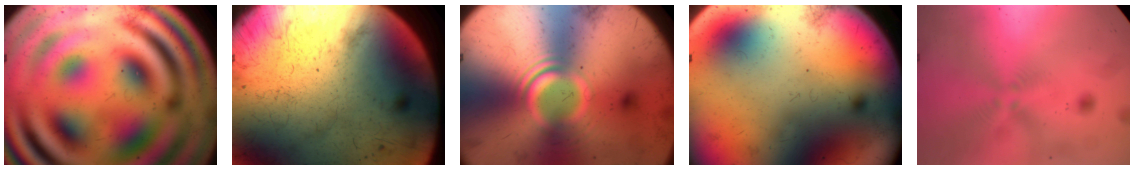
表 4: 石英楔子光性判断结果

样品名称	插入石英楔子的实验现象	光性判断
z-LN	一三象限干涉彩环向外扩张，二四象限干涉彩环向内收缩	负光性
z-SiO_2	一三象限干涉彩环向内收缩，二四象限干涉彩环向外扩张	正光性
z-Al_2O_3	一三象限干涉彩环向外扩张，二四象限干涉彩环向内收缩	负光性
z-TeO_2	一三象限干涉彩环向内收缩，二四象限干涉彩环向外扩张	正光性
α-BBO	一三象限干涉彩环向外扩张, 二四象限干涉彩环向内收缩	负光性

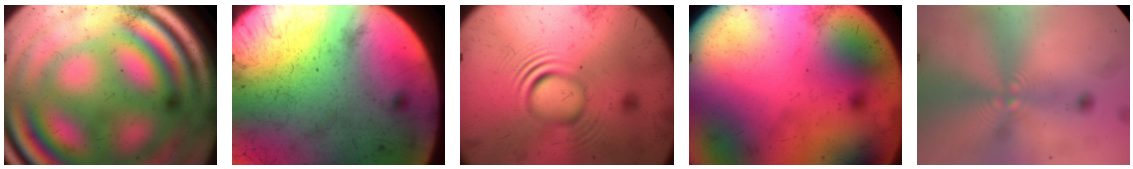
经过对比，可知其判断结果与一级红片 (能判断的) 一致，并且其判断能力更优于一级红片法，对于一级红片法无法判断的我们仍然可以通过干涉色环的移动判断其正负光性。综上，我们发现石英楔子判断正负光性的效果更好，其核心原因在于**一级红片条纹静态，而石英楔子在插入的过程中条纹动态变化**，更易看出其变化规律



(a1) z-$LiNbO_3$ 浅 (b1) z-Al_2O_3 浅 (c1) z-TeO_2 浅 (d1) z-薄 SiO_2 浅 (e1)α-BBO 浅



(a2) z-$LiNbO_3$ 中 (b2) z-Al_2O_3 中 (c2) z-TeO_2 中 (d2) z-薄 SiO_2 中 (e2)α-BBO 中

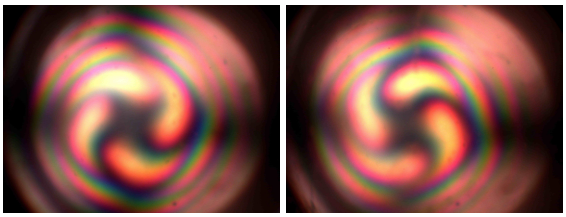


(a3) z-$LiNbO_3$ 深 (b3) z-Al_2O_3 深 (c3) z-TeO_2 深 (d3) z-薄 SiO_2 深 (e3)α-BBO 深

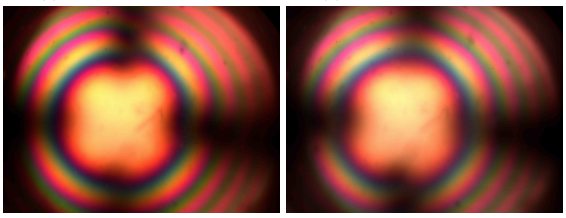
图 23: 石英楔子实验观测结果图

5.6 旋光性判断

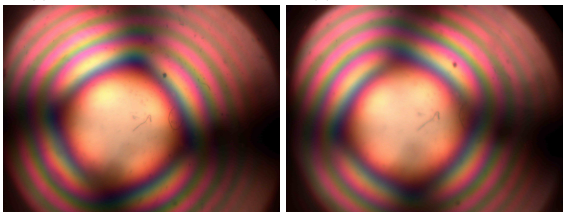
利用观察埃利旋转向的方法，判断厚石英（大方和小圆），以及 z 切薄石英片的旋光性质，实验结果如图24



(a) 小圆在上，大方在下 (b) 小圆在下，大方在上



(c) 小圆在上，薄石英在下 (d) 小圆在下，薄石英在上



(e) 大方在上，薄石英在下 (f) 大方在下，薄石英在上

图 24: 埃利旋转向法实验观测结果

根据图14可知，大方在下时产生的埃利旋与左旋在下一致，因此大方为左旋，而小圆在下时埃利旋与右旋在下一致，

因此小圆为右旋，即为两者的旋光性结果。

同时，我们利用同样的方法对 z 切薄石英进行判断，其实验结果如图24所示，通过实验结果的 (c)、(d) 我们可以观测到，小圆与薄石英叠加时无论什么顺序，均不会出现埃利旋，已经可以说明薄石英与小圆的旋光性一致，为右旋。

但我们为保证实验完整性，仍然可以利用大方对这个结论进行验证，通过大方与薄石英进行上下交叠，可以发现薄石英在下时的 (e) 产生的埃利旋为右旋在下所产生的，故薄石英为右旋性，以及大方在下时的 (f) 也可看出埃利旋，进一步验证了薄石英的右旋性质。

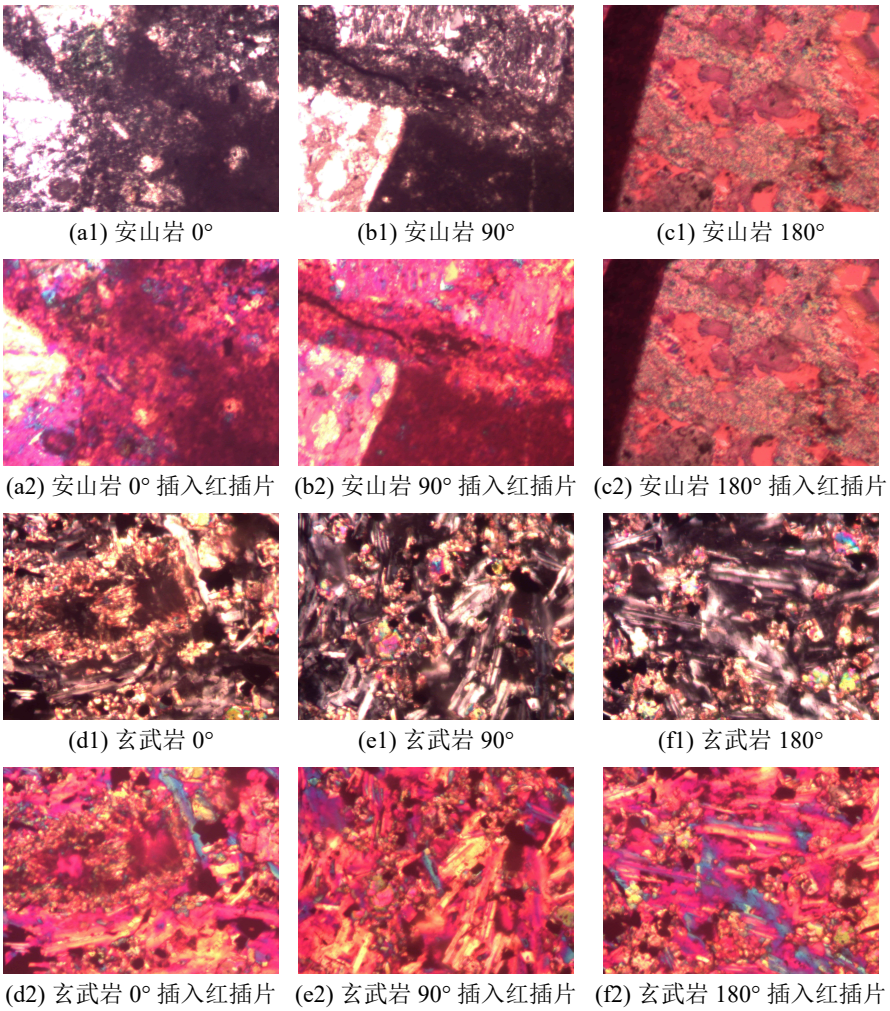
埃力旋不明显分析 但我们发现，薄石英与大方交叠时，埃利旋并不明显，此时仅能大致看出形状，经过分析，实际上是由于薄石英的厚度过小，其旋光效果并不明显，但我们可以进一步改进实验，利用实验时的两片薄石英叠加，其会产生更加明显的埃利旋，从而判断其旋光性。

5.7 拓展实验

最后进行拓展实验，我们选取了安山岩和玄武岩两种岩石，分别用偏光显微镜和锥光干涉进行观测记录

5.7.1 偏光显微

首先我们在正交偏光状态，不加一级红片与加一级红片直接观察结果如图25



(a1) 安山岩 0° (b1) 安山岩 90° (c1) 安山岩 180°

(a2) 安山岩 0° 插入红插片 (b2) 安山岩 90° 插入红插片 (c2) 安山岩 180° 插入红插片

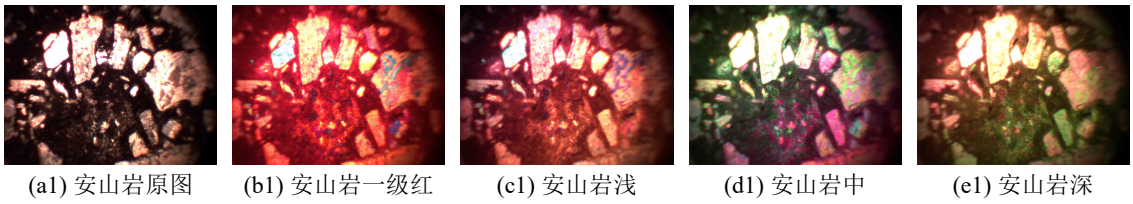
(d1) 玄武岩 0° (e1) 玄武岩 90° (f1) 玄武岩 180°

(d2) 玄武岩 0° 插入红插片 (e2) 玄武岩 90° 插入红插片 (f2) 玄武岩 180° 插入红插片

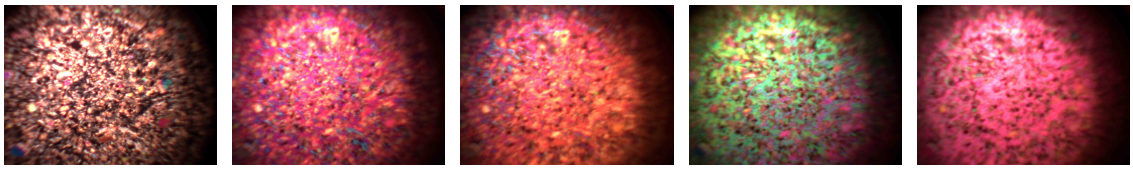
图 25: 岩石偏光显微镜实验观测结果图

5.7.2 锥光干涉

接着我们对之前的岩石进行锥光干涉实验，分别测量原图，插入以及红片和石英楔子插入不同深度实验结果如图



(a1) 安山岩原图 (b1) 安山岩一级红 (c1) 安山岩浅 (d1) 安山岩中 (e1) 安山岩深



(a2) 玄武岩原图 (b2) 玄武岩一级红 (c2) 玄武岩浅 (d2) 玄武岩中 (e2) 玄武岩深

图 26: 岩石锥光干涉实验观测结果图

6 结论

本实验通过透射偏光显微镜系统研究了单轴晶体的光学各向异性，完成了从基础现象观测到定量参数测量再到晶体性质鉴定的完整实验流程，主要结论如下：

1. 正交偏光干涉实验验证了晶体双折射的基本特性

所有待测各向异性晶体（A 片、B 片、x 切白云母、x 切薄石英、x 切 LN 等）在正交偏光下均表现出典型的 4 明 4 暗消光现象，这是由于转动载物台时，晶体光轴会四次与上下偏光镜振动方向平行，导致合成光强为零。采用一级红插片法完成了 6 个未知晶片的快轴方向与光程差测量，结果表明样品光程差均处于一级干涉色范围内（100nm-320nm），与观测到的干涉色高度吻合。对于光程差接近 560nm 的异常样品，分析了其消光不完全和无蓝绿色干涉色的成因，验证了一级红插片法的适用范围。

2. 锥光干涉实验揭示了不同取向晶体的光学特征

观测并分类了三类典型晶体切片的锥光干涉图：

- 垂直光轴（Z 切）切片呈现中心黑十字与同心干涉环，旋转载物台图样不变，干涉环颜色由晶体双折射率和厚度决定；
- 斜交光轴切片呈现歪心黑十字，光轴出露点随载物台旋转做圆周运动，厚样品因光程差过大仅能观察到黑白明暗环；
- 平行光轴（X 切）切片呈现瞬变干涉图，黑十字对载物台转动极为敏感，稍作转动即分裂为双曲线并移出视域。

实验还观测到 z-TeO_2 的双重十字结构和 α-BBO 的旋光分裂现象，丰富了对特殊晶体光学性质的认识。

3. 两种光性正负鉴定方法的对比与应用

对比了一级红插片法和石英楔子法在光性正负鉴定中的性能：一级红插片法操作简单、现象直观，适用于光程差较小的普通晶体；石英楔子法为连续补偿，抗干扰能力强，适用于所有 Z 切样品，尤其对旋光性晶体和高双折射率晶体具有明显优势。实验成功鉴定了 z-$LiNbO_3$（负光性）、z-SiO_2（正光性）、z-Al_2O_3（负光性）、z-TeO_2（正光性）和 α-BBO（负光性）的光性正负，两种方法结果一致。

4. 埃利旋转向法实现了石英旋光性的准确判断

利用埃利旋的方向与下层晶片旋光性一致的原理，成功判断出大方石英为左旋，小圆石英为右旋，z 切薄石英为右旋。实验发现薄石英因厚度过小导致埃利旋不明显，提出了叠加多片薄石英以增强旋光效果的改进方案。

5. 拓展实验验证了偏光显微镜在岩石矿物鉴定中的应用

对安山岩和玄武岩两种岩石样品进行了偏光显微和锥光干涉观测，观察到了岩石中不同矿物颗粒的干涉色和消光现象，初步掌握了利用偏光显微镜鉴定岩石矿物的方法。

综上，本实验全面验证了晶体光学的核心理论，熟练掌握了偏光显微镜的操作和晶体光学性质的鉴定技术，实验流程规范，数据可靠，达到了预期的实验目的。

7 思考题

问题 1：光性正负鉴定两种方法的异同点，以及其适用的 Z 切样品类别。

答：两种方法分别为石英楔子法和一级红插片法，异同点及适用范围如下：

1. 相同点：均基于光程差补偿原理，通过观察干涉色变化判断晶体光性正负。
2. 不同点：1. 补偿方式不同：石英楔子为连续可变补偿，一级红插片为固定光程差（560nm）补偿；2. 观察现象不同：石英楔子观察干涉彩环移动或色序升降，一级红插片观察四个象限的颜色突变。
3. 适用类别：一级红插片适用于光程差较小、干涉色低于一级红的 Z 切样品；石英楔子法适用于所有 Z 切样品，尤其适合光程差较大、干涉色较高的样品。

问题 2：平行轴（x）切样品的光轴和双折射光程差的判断需要注意哪些问题？如果样品的光程差大于一级红或二级红呢？

答：核心注意事项及高干涉色处理方法如下：

1. 光轴判断：平行轴切片为瞬变干涉图，光轴方向是黑十字分裂后离开视域的方向；转动载物台时，黑十字会沿光轴方向快速移出视域。
2. 光程差判断：需结合正交偏光下的干涉色级序和补色法则，避免将高级白干涉色误判为低干涉色。
3. 高干涉色处理：当光程差大于一级红时，不能直接用一级红插片判断，需使用石英楔子进行连续补偿，通过观察干涉色级序的升降来确定光程差和快慢轴方向。

问题 3：如何判断斜切样品光轴偏离方位；斜切样品的锥光干涉中，为什么厚的样品（铌酸锂）观测不到彩色干涉条纹？

答：判断方法及现象解释如下：

1. 光轴偏离方位判断：斜切样品的锥光干涉图为歪心黑十字，黑十字的交点即为光轴出露点，其在视域中的位置就是光轴偏离的方位；转动载物台时，光轴出露点会绕视域中心旋转，方向与载物台转动方向一致。
2. 厚样品无彩色条纹原因：厚样品的双折射光程差极大，不同波长光的干涉极大和极小相互重叠，导致彩色条纹模糊；同时厚样品的光吸收增强，进一步降低了条纹对比度，最终无法观测到彩色干涉环。

问题 4：双折射率较低时，黑十字粗些，而双折射率较高或晶片较厚时，黑十字较前者细些乃至消失，如何解释？

答：黑十字宽度由消光区域的大小决定，具体解释如下：

1. 双折射率低时：只有非常靠近上下偏光镜振动面（PP/AA 面）的光才会完全消光，稍远区域的光程差很小，干涉光强极弱，人眼无法分辨，因此形成较宽的黑十字。
2. 双折射率高或晶片厚时：光程差随光线与光轴的夹角变化极快，只有严格在 PP/AA 面内的光才会消光，稍远区域的光程差就很大，干涉光强很强，因此黑十字很细；当双折射率极高或晶片极厚时，消光区域极小，黑十字会细到难以分辨，看起来如同消失。

问题 5：各向异性的晶片放于正交偏光镜下，当转动载物台一周时，出现四次消光，如何解释？

答：正交偏光干涉的合成光强公式为：

$$I = A_{oe}^2 \sin^2 2\alpha \sin^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right)$$

其中 α 为晶片光轴与下偏光镜振动方向的夹角。当 $\alpha = 0°90°180°270°$ 时，$\sin 2\alpha = 0$，合成光强为 0，出现消光现象。转动载物台一周（360°），光轴会与上下偏光镜振动方向平行四次，因此会出现四次消光。

参考文献

[1] 蒋民华. 晶体物理 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1980.

[2] 季寿元, 王德滋. 晶体光学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1961.

[3] 金石琦. 晶体光学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.

[4] 郑裕芳, 李仲荣. 近代物理实验 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1989.

[5] 孙业英. 光学显微分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

附录 A: 签名页

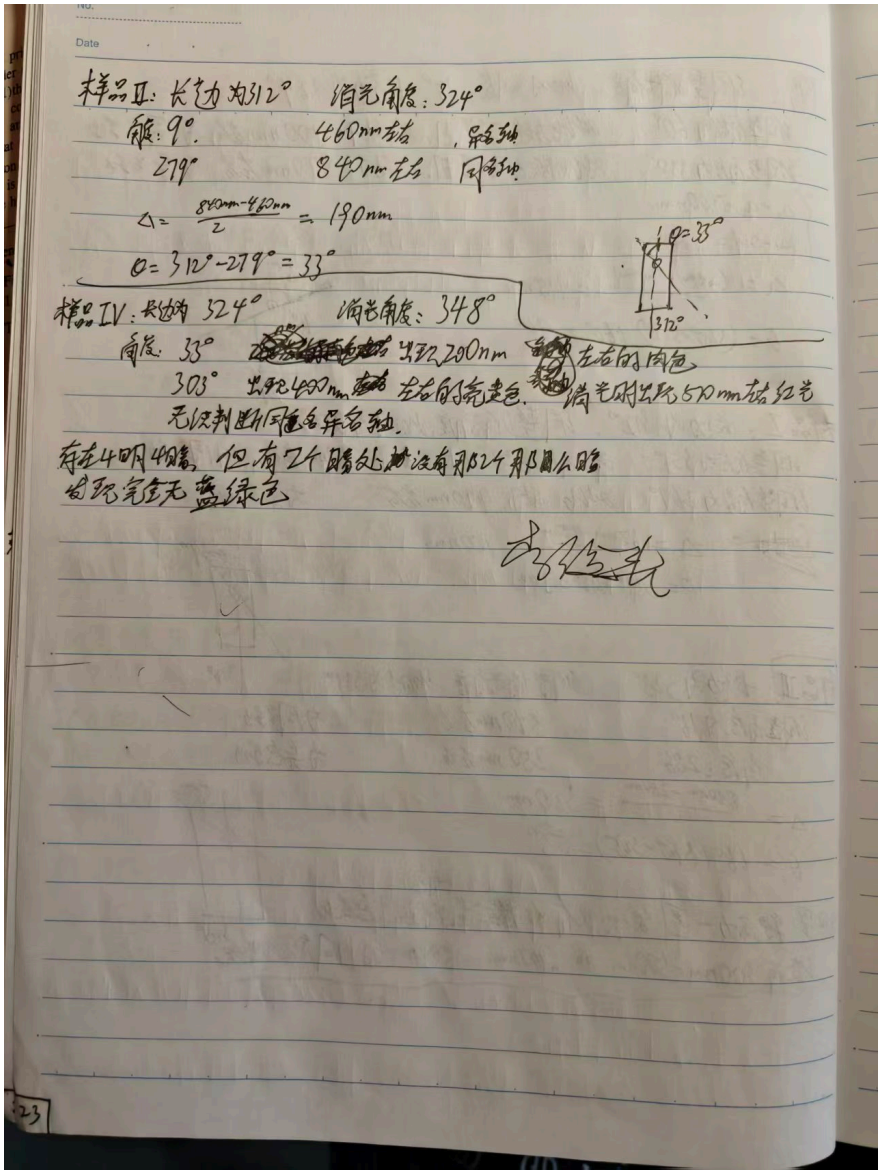


图 27: 第一次实验老师签名页

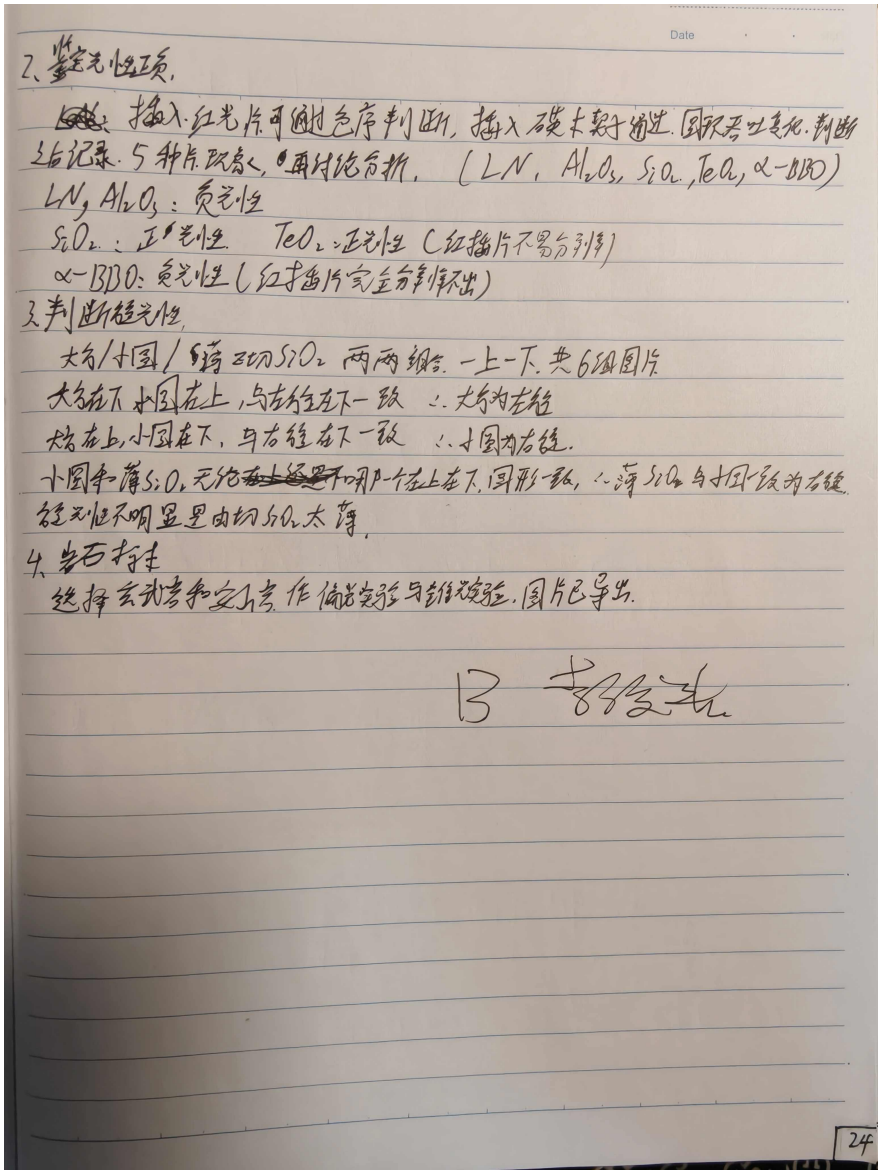


图 28: 第二次实验老师签名页