

第六章 晶体光学

光是一种电磁辐射，在各种波长的电磁波中，能为人所感受的是 400~700nm 的窄小范围。对应的频率范围是： $\nu = 7.6 \sim 4.0 \times 10^{14}$ HZ。这波段内电磁波叫可见光，在可见光范围内，不同频率的光波引起人眼不同的颜色感觉。

一、光的反射和折射

1、结晶质和非晶质

从传统上讲，晶体是指具有天然生长的、规则的凸几何多面体形状的固体，而现代晶体学的概念是指内部质点(原子、离子等)有规律地重复排列的具有格子状构造的物体，但不一定都具有平整的结晶面和规则的几何外形。不过，在某些学科中如宝石学，习惯上仍将“晶体”这一名称专门用于指具有几何多面体外形的晶体，而将不具有几何多面体外形的晶体称为结晶质。晶体具有一定的化学成分，在其同一方向上物理性质相同，但在不同方向上其物理性质可以不同。

内部质点(原子、离子)具有格子状构造的固体物质称为结晶质，简称晶质。

非晶质是指内部原子排列无规律的、不具格子状构造的物体。非晶质的物质有宝石的欧泊、黑曜岩、陨石及玻璃等。

隐晶质是指那些内部由极微细的晶体集合而成、外观不呈晶体而呈块状产出的物质，如玛瑙。

2、光的反射

几何光学的三个实验定律

(1) 光的直线传播定律:

在均匀的各向同性的透明介质中，光沿直线传播。

(2) 光的独立传播定律:

光在不太强时，传播过程中与其他光束相遇时，各光束相互不受影响，不改变传播方向，各自独立传播。

3) 光的反射定律和折射定律:

入射面: 入射光线和法线决定的平面. **反射定律:** 反射光线在入射面内. 入射光线和反射光线分居法线两侧, 入射角等于反射角。当光照射到物体表面时, 将有一部分光由表面折回, 此现象称为光的反射, 人们能观察到不发光物体, 多半是由光的反射的结果。光与物体表面的反射作用符合光的反射法则(斯涅耳定律): 当光照射物体表面时, 入射光线与反射光线分立于法线两侧并与法线共处于同一平面上, 入射角等于反射角。

3、光的折射

当光在不同光密度介质中传播时, 在两种介质的界面处会发生改变其原有传播方向的现象叫做光的折射。当光从光疏介质进入光密介质时, 光线偏向法线方向折射。反之, 当光从光密介质进入到光疏介质传播时, 光线则偏离法线方向折射。只有当入射光与法线有一定夹角时光线才发生折射。当入射光平行法线方向时不发生折射。

光的折射法则: 入射线与法线的夹角称为入射角, 折射线与法线的夹角称为折射角, 入射线与折射线分立于法线两侧, 并与法线同处于一平面上。荷兰科学家斯涅耳(Willebrord Snell van Roijen, 1591-1626)发现, 对给定的任何两种相接触的介质而言, 入射角的正弦与折射角的正弦之比为一常数, 这一比值称为“折射率”, 它可用 $\sin i / \sin \gamma = n$ 表示。对于某一介质的折射率是指它相对于与真空介质而言的。

当光在真空中传播时几乎不发生折射, 它的折射率等于 1, 而相对于空气而言(因与真空介质差异很小), 水的折射率是 1.33, 乙醇的折射率是 1.36。

宝石的折射率一般比较高, 钛酸锶的折射率为 2.409, 立方氧化锆的折射率为 2.15, 金刚石的折射率是 2.417 等等, 这些折射率数值均是钠光灯的 D 线下进行测量的。随所用光线波长的不同, 测得的折射率值将有所不同。这可用光通过三棱镜后产生的色散现象来解释。不同颜色的光其折射率不同, 光由于折射率不同而产生的分解颜色的现象叫色散, 色散最大值取决于物质对紫光和红光的折射率之差, 如尖晶石分别为 1.710 和 1.730, 因此色散为 0.020。色散较大的物质有人造金红石(0.330)、钛酸锶(0.109)、立方氧化锆(0.060)、金刚石(0.044)等, 这些

晶体加工成宝石戒面时可产生色彩斑斓的效果，宝石学上称为“火彩”。

4、光的全反射

(1)、临界角

当光线由光密介质进入光疏介质时，折射角大于入射角，随着入射角的增大，折射角也逐渐增大，当折射角等于 90° 时，此时光线就不再进入光疏介质，而是沿着两介质的界面传播，该入射角被称为临界角。

(2)、全反射

当入射角小于临界角时，则入射光线将离开光密介质进入光疏介质；反之当入射角大于临界角时则光线将全部返回光密介质，这种现象叫做光的全反射。

(3)、各种物质的临界角

水的临界角为 $48^\circ 36'$ ，而冰(H_2O)的为 $50^\circ 20'$ ，玻璃的为 $41^\circ 50'$ ，水晶(SiO_2)的为 $40^\circ 50'$ ，这些物质的临界角较大。红宝石(Al_2O_3)的临界角为 $34^\circ 37'$ ，尖晶石($MgAl_2O_4$)为 $35^\circ 36'$ ，黄玉($Al_2(F,OH)_2SiO_4$)为 $37^\circ 50'$ 。钻石(C)的临界角较小，为 $24^\circ 25'$ ，而人造金红石(TiO_2)为 $22^\circ 28'$ ，钛酸锶为 $24^\circ 32'$ ，立方氧化锆(ZrO_2)为 $27^\circ 43'$ 。因钻石的临界角较小，全反射的范围宽，光很容易发生全反射，反射光量大，所以金刚石在打磨后可以显出极强的光泽，而人造金红石、钛酸锶和立方氧化锆等晶体的临界角也很小，因此经常用于仿造钻石。

二、光的偏振态概念

光是横波，光的振动方向应始终与光的传播方向垂直。但是，在垂直于光的传播方向的平面内，光矢量还可以有不同的振动状态，我们称在垂直于光传播方向的二维平面内，光矢量的振动状态叫做光波的偏振态。

光波按偏振态来划分，可分为三大类：

(1)自然光，(2)完全偏振光，(3)部分偏振光。

普通光源中包含许许多多分子和原子，不同的原子或分子所发光波，或同一原子不同时刻所发光波，其振动方向振幅，初始相位各不相同。

在垂直于光传播方向的平面内，在观测最小时间间隔内，光振动在各个方向

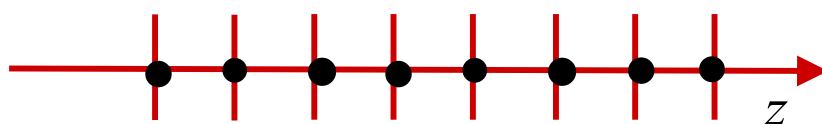
上的几率相同,没有那一个方向占更大优势.我们称这种光为自然光.

用来表示垂直于光传播方向的平面内,光振动方向的矢量图,叫做迎光矢量图.该图表示迎着光传播方向看到的光振动的情况.在迎光矢量图上,自然光是一些均匀分布的辐射线.

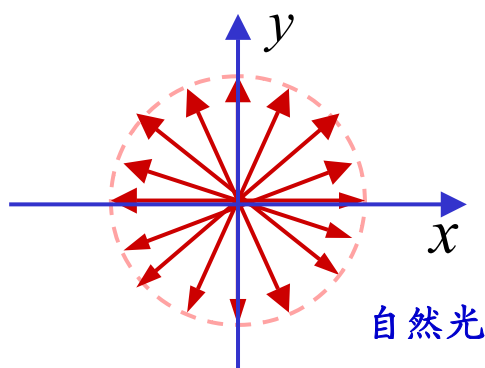
1、线偏振光

这种偏振光,光振动电矢量总是在一个固定的平面内,所以这种偏振光又

叫做平面偏振光.在与光传播方向垂直的平面内,电矢量端点的轨迹是一条直线,光振动只改变振幅大小,不改变方向.



自然光的一种表示方法



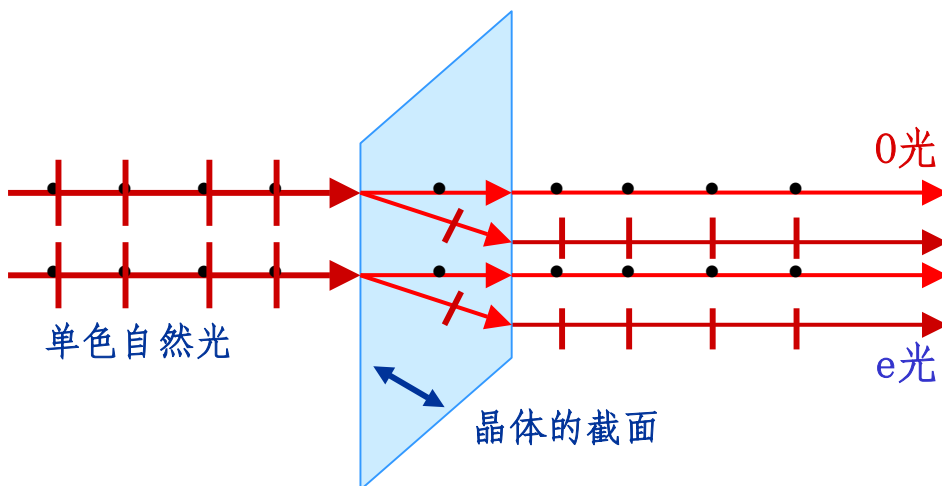
自然光

2、晶体的双折射现象

一束单色自然光垂直入射于晶体的表面,进入晶体后,变为两束光.

晶体绕入射光方向旋转,寻常光(O光)不动,非常光(e光)随着晶体旋转.

光轴:晶体中有一个方向,光沿这个方向传播不发生双折射,这个方向叫做光轴.



主平面: 包含光轴和光线本身的平面,称为该光线的主平面.

寻常光(O 光): (1) 是振动面垂直与自己的主平面的线偏振光;

(2) 符合折射定律和反射定律;

(3) 沿各个方向折射率相同, 传播速度相同.

非常光(e 光):

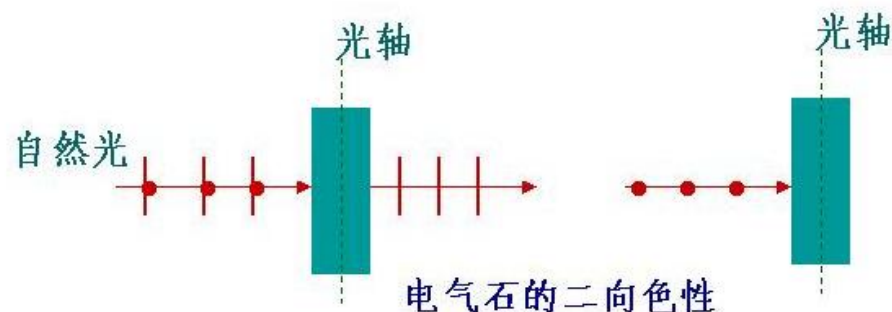
(1) 是振动面平行于自己的主平面的线偏振光;

(2) 一般不符合折射定律, 只有在垂直于光轴的方向传播时才符合折射定律.

(3) 沿不同方向传播时, 其折射率各不相同, 传播速度也不同. 但沿光轴的方向传播时其折射率和速度与 O 光相同.

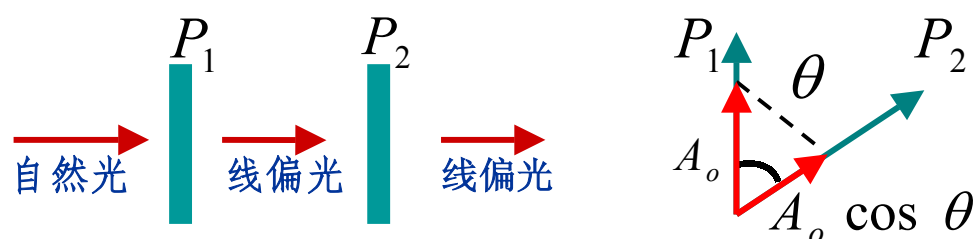
3、偏振片及马吕斯定律

某些双折射晶体(例如电气石), 其对光振动垂直于光轴的线偏振光强烈吸收, 而对光振动平行与光轴的线偏振光吸收很少 (吸收 o 光, 通过 e 光), 这种对线偏振光的强烈的选择吸收性质, 叫做二向色性.



这种二向色性晶体叫做偏振片. 人造偏振片是由聚乙烯醇薄膜加热拉伸浸碘制成. 人造偏振片有造价低, 面积大等优点.

自然光经过偏振片后, 变为振动面平行于偏振片光轴 (透振方向), 强度为自然光一半的线偏振光. 因此, 偏振片可作为起偏器.



上图 中 P_1 为起偏器, 设经 P_1 后线偏振光振幅为 A_0 , P_2 与 P_1 夹角为 θ , 因此经 P_2 后的线偏振光振幅为 $A=A_0\cos\theta$ 。

$$I = I_0 \cos^2 \theta.$$

若线偏振光的强度为 I_0 , 则透过 P_2 后的线偏振光的强度为上式称为马吕斯定律。 P_2 绕着入射光旋转一周, 当 $\theta=0^\circ, 180^\circ$ 时, 出射光强最强, 为 I_0 。当 $\theta=90^\circ, 270^\circ$ 时, $P_1 \perp P_2$, 出射光强为零, 其他情况, 其强度介于 I_0 和零之间。我们称观察到的这种现象为“两明两零”。只有入射线为偏振光时才有这种现象, 因此偏振片也可作检偏器。任何偏振态的光透过偏振片后, 都变为线偏振光。

所谓正交偏光显微镜, 是指光学显微镜含有两个互相垂直的偏光片, 用 PP 代表下偏光镜的振动方向, AA 代表上偏光镜的振动方向。由于自然光通过下偏光镜后, 就成为振动方向平行 PP(下偏光镜的振动方向)的偏光, 至上偏光镜时, 因与上偏光镜的振动方向 AA 互相垂直, 自然光完全不能透过, 因此整个视域呈现黑暗。

如样品颗粒(岩石薄片)在正交偏光镜间也呈现黑暗的现象, 此称为消光现象。非均质体垂直光轴的切面以外的任何方向切面, 在正交偏光镜间处于消光时的位置, 称为消光位。在正交偏光镜下, 透过下偏光镜的偏光, 射入晶体(非均质体样品)时, 必然要发生双折射, 产生振动方向平行光率体椭圆切面长、短半径的两种偏光, 即透过下偏光镜的偏光, 在光率体的椭圆切面长、短半径方向上进行矢量分解。当光率体的椭圆切面长、短半径与上、下偏光镜的振动方向(AA, PP)一致时, 从下偏光镜透射出的振动方向平行 PP 的偏光, 可以透过样品而不改变原有的振动方向。当其到达上偏光镜时, 因 PP 与 AA 垂直, 透不过上偏光镜而使晶粒消光。旋转物台一周过程中, 晶体的光率体椭圆半径与上、下偏光镜的振动方向(PP、AA)有四次平行的机会, 故岩石薄片(标准厚度为 0.03mm)中这部分颗粒可出现四次消光现象(四次明暗交替)。

在正交偏光镜间呈现全消光的颗粒样品, 可能是均质体矿物, 也可能是非均质矿物垂直光轴的切片。而呈现四次消光的颗粒, 则一定是非均质体矿物, 所以四次消光现象是非均质体的特征。

三、晶体的光率体的概念

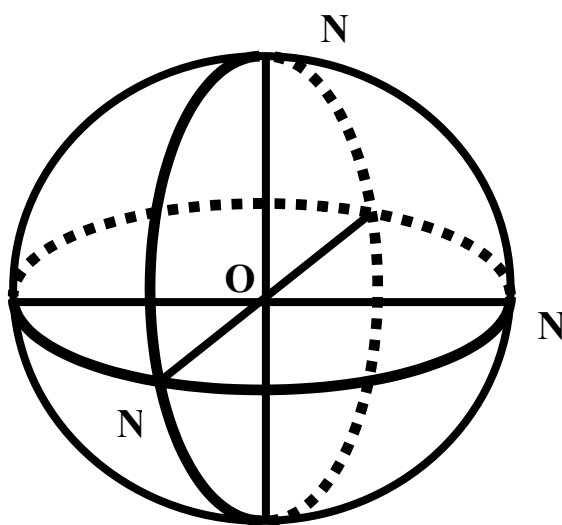
除等轴晶系以外的晶体，它具有使入射线分解成两条单独光线的结构，这两条光线彼此间是完全独立的，并以不同的路线传播，其传播速度互不相同，它是由于晶体的不同方向其折射率不同而引起的，也就是说，许多晶体具有一个以上的折射率。

光波在晶体中传播时，不同振动方向晶体的折射值可以有所不同，为了形象地表示光波在晶体中传播时的特征，设想自晶体中心起，沿光波的各个振动方向，按比例截取晶体在该方向上的相应的折射率值，再把各个线段的端点联系起来，便构成了所谓的光率体，它是光波振动方向与相应折射率值之间关系的一种光性指示体，可用椭球面方程 $X^2/n_1^2 + Y^2/n_2^2 + Z^2/n_3^2 = 1$ 表示，其中 n_1 、 n_2 、 n_3 为晶体的三个主折射率。光率体是从晶体的光学现象中抽象出来的立体概念，它反映了晶体光学性质中最本质的特性。它形状简单，应用方便，可以利用不同方向的晶体切面，在宝石折射仪上测出。

由于各类晶体的光学性质不同，所构成的光率体形状也不相同，兹分述如下：

1、均质体的光率体

等轴晶系晶体和非晶质体物质都是各向同性的光性均质体，光波在均质体(如玻璃、钻石)中传播时，向任何方向振动，其传播速度不变，折射率都相等，均质体光率体任何方向的切面都是一个圆切面，圆切面的半径代表均质体的折射率值，因此，均质体的光率体是一个圆球体，可用球面方程表示 $X^2 + Y^2 + Z^2 = n^2$ ，其中 n 为均质体的折射率。如所谓的中国大红宝石，其实是尖晶石，其光率体是以 1.718 为半径的圆球体。



在岩石(矿物集合体)薄片，在两个

折射率不同的物质接触处，可以看到一条比较黑暗的边缘，称为矿物的边缘(相当于晶界)。在边缘的邻近处可见到一条比较明亮的细线，称为贝克线(becke line)或亮带。边缘和贝克线是由于两邻近的物质折射率不同，光通过两者的接触面时，发生折射、全反射作用引起的。

当两种物质折射率相差很小时，在白光下观察，由于物质的折射率色散的影响，在两种折射率相近的无色矿物的边界线附近，贝克线表现为，在折射率较低的矿物一边，出现橙黄色细线；在折射率较高的矿物一边，出现浅蓝色细线，这种现象称为洛多契尼可夫色散效应。

在单偏光显微镜下，提升显微镜镜筒，贝克线向折射率大的物质移动；下降镜筒，贝克线向折射率小的物质移动；根据贝克线的移动规律，可以确定相邻两物质的折射率的相对大小。贝克线的灵敏度较高，两物质折射率差 0.001 时(单色光 0.0005)，贝克线仍可清晰可辨。

在岩石薄片(矿物颗粒的厚度均为 0.03mm)，各种不同的矿物表面好像高低不平，某些矿物表面显得高一些，某些矿物的表面显得低一些，这种矿物表面突起来的现象称为突起。

矿物突起的高低取决于矿物周围的树脂(一般为加拿大树胶)与矿物的折射率差值的大小，差值越大，矿物的突起越高；反之，差值越小，矿物的突起越低。加拿大树胶的折射率为 1.54，折射率大于 1.54 的矿物属于正突起；折射率小于 1.54 的矿物属于负突起。当矿物与加拿大树胶接触时，提升显微镜镜筒，贝克线向矿物内移动时为正突起，贝克线向加拿大树胶移动时为负突起；浅蓝色细线在矿物一边，橙黄色细线在加拿大树胶一边为正突起；反之，浅蓝色细线在加拿大树胶一边，橙黄色细线在矿物一边为负突起。

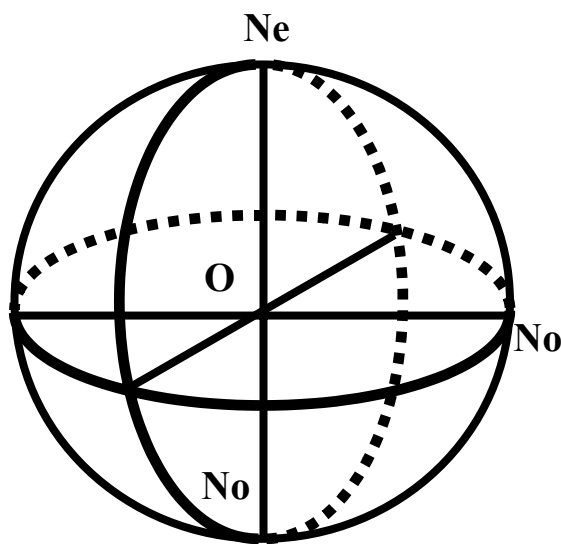
等轴晶系晶体和非晶质体物质可以用重液法测定折射率：(1)、将晶体放入已知折射率的重液中；(2)、观察晶体的突起；(3)、突起越低，样品的折射率越接近重液的折射率。(4)、用阿贝折射仪校正重液的折射率。

2、一轴晶光率体

中级晶族三、六方晶系和四方晶系晶体的水平结晶轴 a、b 相等，因此其水

平方向上的光学性质相同。这类晶体的光性特点是，它具有最大和最小两个主折射率值，分别以符号 N_e 、 N_o 或 ϵ 、 ω 表示，可以用椭球面方程 $(X+Y)^2/N_o^2 + Z^2/N_e^2 = 1$ 来表示， N_e (ϵ)、 N_o (ω) 分别表示坐标系 Z 和 X (或 Y) 方向上的折射率。当光波振动方向平行 Z 轴时，被称为非常光，相应的折射率值为 N_e ；当光波振动方向垂直 Z 轴时，被称为常光，相应的折射率值为 N_o ；而当光波振动方向斜交 Z 轴时，折射率值大小介于 N_e 与 N_o 之间，用 N_e' 表示。显然，一轴晶光率体是一个以 Z 轴为旋转轴的旋转椭球体，依据椭球体的形状可分为两类，以石英和方解石为例，分别加以说明：

当光波沿石英 (α - SiO_2) c 轴方向射入晶体时，因石英的 a 、 b 水平轴相等，它将不产生双折射，在宝石折射仪上可测得光波垂直 Z 轴振动时的折射率均为 1.544，即 $N_o=1.544$ 。以此数值为半径构成一个垂直入射光波（即垂直 Z 轴）的圆切面，该切面的双折率为零。当光波垂直石英 Z 轴射入晶体时，因石英的 a 、 c 两结晶轴单位不等，它将产生双折射分解形成两种偏光，其一振动方向垂直 Z 轴（为常光），可测得其折射率为 1.544；另一种偏光振动方向平行 Z 轴，则得其折射率 $N_e=1.553$ 。在 Z 轴方向上，从中心向两边以一定比例截取 N_e 值，在垂直 Z 轴的方向上以一定比例截取 N_o 值，以此两个线段为长短半径，构成一个垂直入射光波，包含 Z 轴的椭圆切面。将 N_e 和 N_o 值代入椭球面方程可得： $(X+Y)^2/1.544^2 + Z^2/1.553^2 = 1$ ，它构成一个以 Z 轴为旋转轴的长形旋转椭球体，此乃石英的光率体，其旋转轴为光轴。



这种光率体的特点是其旋转轴（光轴）与椭球体长轴方向一致，即椭球体长轴与 Z 轴一致，光波平行光轴振动时的折射率总是比垂直光轴振动时的折射率大，即 $N_e > N_o$ 。通常将这类光率体称为一轴晶正光性光率体，相应的矿物称一轴晶正光性矿物。

当光波射入方解石 (CaCO_3) 晶体时，由于方解石的晶体结构是由 $(\text{CO}_3)^{2-}$ 阴离子

团与 Ca^{2+} 阳离子呈沿 3 次轴方向压扁状的 NaCl 结构排列，明显的非均质性的 $(\text{CO}_3)^{2-}$ 平面垂直 C 轴方向分布，平行于 $(\text{CO}_3)^{2-}$ 平面的分量遇到高密度的氧电子，导致光波在该方向上的分量传播速度落后于平行 C 轴方向上的分量，形成平行 Z 轴的折射率 $n_e (=1.486)$ 小于垂直 Z 轴方向上的折射率 $n_o (=1.658)$ ，可以得出方解石的光性体是一个以 Z 轴为旋转轴的扁平旋转椭球体。与石英的光率体的区别在于其旋转轴（光轴）与椭球体短轴方向一致。光波平行光轴振动时的折射率总是比垂直光轴振动时的折射率小，即 $n_e < n_o$ 。这类光率体称为一轴晶负光性光率体，相应的矿物称一轴晶负光性矿物。

无论是正光性还是负光性的一轴晶晶体，其光率体都是旋转椭球体；其直立旋转轴必定是 n_e ，水平轴是 n_o 。 n_e 、 n_o 代表一轴晶晶体折射率的最大和最小值，称为主折射率，一轴晶矿物只有两个主折射率。一轴晶矿物的光性正负取决于 n_e 与 n_o 的相对大小。当 $n_e > n_o$ ，称为一轴晶正光性；当 $n_e < n_o$ ，称为一轴晶负光性。 n_e 与 n_o 的差值的绝对值为一轴晶晶体的最大双折射率。

在正交偏光显微镜下鉴定晶体时，我们所遇到的是相当于晶体光率体在载玻片方向上的切面。一轴晶光率体主要有下列三种切面：

垂直光轴（或结晶轴 Z 轴）的切面：为圆切面，其圆半径等于 n_o 。光波垂直这种切面入射（即平行光轴入射）时，它将不产生双折射，也不改变入射光波的振动方向，其折射率等于 n_o ，其双折射率等于零。一轴晶光率体只有一个唯一的圆切面。这种切面与均质体的光性相同，在显微镜下不易区分，但出现这种切面的几率非常小。

平行光轴的切面：为椭圆切面，光波垂直这种切面入射（即垂直光轴入射），将产生双折射分解形成两种偏光，其振动方向分别平行椭圆切面的长短半径。相应的折射率值分别等于椭圆切面的长短半径 n_e 与 n_o 。当晶体为正光性时，椭圆的长半径为 n_e ，短半径为 n_o ；反之，负光性长半径为 n_o ，短半径为 n_e 。双折率等于椭圆切面长短半径 n_e 与 n_o 之差，是一轴晶晶体的最大双折率，这种切面是我们最希望得到的理想切面，其出现的几率比垂直光轴的切面要高，但比以下的斜交光轴的切面要低。

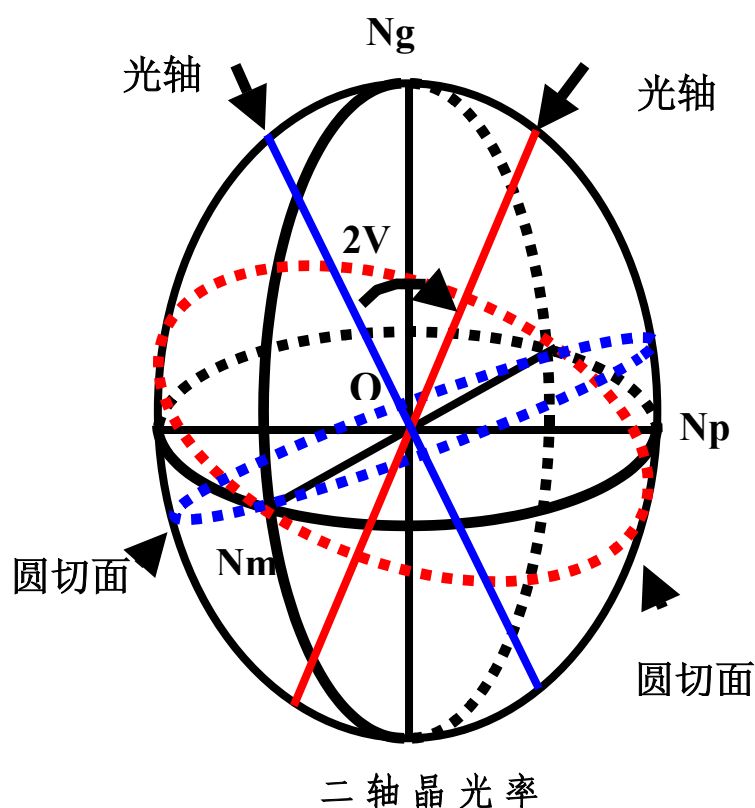
斜交光轴的切面：仍为椭圆切面，其长短半径分别等于 n_o 与 n_e 。光波垂直这种切面入射时（即斜交光轴入射），也将产生双折射分解形成两种偏光，其

振动方向分别平行椭圆切面的长短半径，相应的折射率必分别等于椭圆切面长短半径 N_o 与 $N'e$ 。双折率值等于椭圆切面长短半径 N_o 与 $N'e$ 之差，其大小递变于零与最大双折率之间。一轴晶任何斜交光轴的椭圆切面的长短半径中，始终有一个是 N_o 。当光性为正时，短半径是 N_o ；光性为负时，长半径是 N_o 。这种切面是最常见的切面，其出现的概率最高，在岩石薄片中所观察到的切面绝大多数属于这种切面，而垂直光轴和平行光轴的切面出现的几率要低得多，除非晶体出现定向分布。因此，通常我们测量所得到的两个折射率值，是 N_o 与 $N'e$ 的值，并非是两个主折射率值，这一点应引起高度的注意。

3、二轴晶光率体

低级晶族的斜方、单斜和三斜晶系晶体都属于二轴晶光性体。这类晶体的三个结晶轴单位互不相等，即 $a \neq b \neq c$ ，表示晶体在三度空间上具有各向异性。二

轴晶光性体有大、中、小三个主折射率，分别与互相垂直的三个振动方向相当，并以符号 N_g 、 N_m 、 N_p 或 γ 、 β 、 α 表示，而与其它振动方向相当的折射率值递变于 $N_g(\gamma)$ 、 $N_m(\beta)$ 、 $N_p(\alpha)$ 之间，分别以 N'_g 和 N'_p 代表，即 $N_g > N'_g > N_m > N'_p > N_p$ 。显然，二轴晶光率体是一个三轴不等的椭球体，可用方程 $X^2/n_1^2 + Y^2/n_2^2 + Z^2/n_3^2 = 1$ 来描述， n_1 、 n_2 、 n_3 分别代表 X、Y、Z 坐标系上的三个主折射率，并各自与 $N_g(\gamma)$ 、 $N_m(\beta)$ 、 $N_p(\alpha)$



之一相对应。现以斜方晶系宝石矿物黄玉 (Topaz, $Al_2[SiO_4](F,OH)_2$) 为例来说明二轴晶光率体的构成。

当光波沿黄玉 c 轴方向射入晶体时，它将产生双折射分解形成两种偏光，其一振动方向平行 X 轴，可测得其折射率值等于 1.619，另一偏光振动方向平行 Y 轴，测得其折射率值等于 1.622。以该折射率为长短半径构成一个垂直入射光波（即垂直 Z 轴）的椭圆切面。

当光波沿黄玉 a 轴方向射入晶体时，也将发生双折射形成两种偏光，其一振动方向平行 Y 轴，折射率等于 1.622；另一偏光振动方向平行 Z 轴，折射率等于 1.628。同样构成一个垂直入射光波（垂直 X 轴）的椭圆切面。

当光波沿黄玉 b 轴方向射入晶体时，也将分解形成两种偏光，其一振动方向平行 X 轴，折射率等于 1.619；另一偏光振动方向平行 Z 轴，折射率等于 1.628。同样构成一个垂直入射光波（垂直 Y 轴）的椭圆切面。

将上述所得的平行 X、Y、Z 方向上的三个主折射率值 1.619、1.622、1.628 作为 n_1 、 n_2 、 n_3 分别代入方程式 $X^2/n_1^2 + Y^2/n_2^2 + Z^2/n_3^2 = 1$ 中，可得到一个三轴不等的椭球体，它便构成了黄玉的光率体。

从黄玉的三个主要方向切面可以看出，它具有大(1.628)、中(1.622)、小(1.619)三个主折射率，它们的振动方向与晶体的三个结晶轴相平行，由于斜方晶系 a、b、c 的取向有六种不同的方式，因此，在未确定晶体定向之前，讨论 N_g 、 N_m 、 N_p 与哪个结晶轴相平行是毫无价值的。实验证明，其他二轴晶矿物也都有大、中、小（ N_g 、 N_m 、 N_p 、）三个主折射率分别互相垂直的三个振动方向相当，只是其主折射率值（ N_g 、 N_m 、 N_p 、）的大小及与它们相当的互相垂直的振动方向在晶体中的位置与黄玉不相同而异。

三轴椭球体中三个互相垂直的轴，代表二轴晶光性体的三个主要光学方向，称光学主轴或称主轴，即 $N_g(\gamma)$ 、 $N_m(\beta)$ 、 $N_p(\alpha)$ 。把包含两个主轴的切面称为主轴面，二轴晶光率体有三个互相垂直的主轴面，它们分别为 N_gN_p 面、 N_gN_m 面和 N_mN_p 面。

因二轴晶光率体是一个三轴椭球体，通过光率体的第二个主轴（即 N_m 轴）在光率体的一边可作一系列切面，得到一系列半径不同的椭圆切面，但它们的半径之一始终为 N_m ，另一个半径的大小递变于 N_g 与 N_p 之间，因系连续变化，在它们之间总可找到一个半径为 N_m 的圆切面。同样，在光率体的另一边也可截出另一个圆切面。这两个圆切面实际上是椭球体($X^2/1.619^2 + Y^2/1.622^2 + Z^2/1.628^2 = 1$)

与圆球体($X^2+Y^2+Z^2=1.622^2$)的交线。光波垂直这两个圆切面入射时,将不发生双折射,将这两个特殊方向称为二轴晶的光轴。两个光轴之间所夹的锐角为光轴角,又称 $2V$ 角。当 $N_g-N_m > N_m-N_p$ 时,称为二轴晶正光性;当 $N_g-N_m < N_m-N_p$ 时,称为二轴晶负光性。可用下列公式求得 $2V$ 角: $\tan^2\alpha = N_g^2(N_m^2-N_p^2) / \{N_p^2(N_g^2-N_m^2)\}$, 若 $\alpha < 45^\circ$, 晶体为二轴晶正光性,光轴角 $2V=2\alpha$; 若 $\alpha > 45^\circ$, 晶体为二轴晶负光性,光轴角 $2V=2(90^\circ -\alpha)$ 。

四、光性方位和正交偏光

1、中级晶族晶体的光性方位

中级晶族晶体只有一个高次轴(三次、六次或四次轴),一轴晶光率体的旋转轴(光轴)与晶体的唯一高次对称轴(c轴)相一致;无论是正光性晶体,如石英: $N_e(\epsilon, \text{epsilon})=1.553(//Z)$, $N_o(\omega, \text{omega})=1.544(\perp Z)$, $N_e > N_o$; 还是负光性晶体,如方解石: $N_e(\epsilon)=1.486$, $N_o(\omega)=1.658$, $N_e < N_o$, 都是光率体的光轴与晶体的 c 轴一致。

2、低级晶族晶体的光性方位

二轴晶光率体具有三个互相垂直的二次对称轴(主轴),三个对称面(主轴面),一个对称中心。其对称要素相当于斜方晶系的最高对称 $3L^23PC$, 所以斜方晶系的光性方位是:光率体的三个主轴与晶体的三个结晶轴相重合。至于是那一个主轴与那一个结晶轴重合,因晶体不同而不同。如宝石黄玉是: $N_m=Y$ 轴, $N_g=Z$ 轴, $N_p=X$ 轴。($N_g(\gamma) > N_m(\beta) > N_p(\alpha)$)。

单斜晶系晶体的最高对称要素为 L^2PC 。在晶体定向时,如取 b 为唯一轴,此时 b 轴方向包含二次对称轴或与对称面的法线重合,它可与光率体三个主轴之一重合,其余二主轴与结晶轴斜交。究竟是那一个主轴与 Y 轴一致,其它二主轴与 Z 轴或 X 轴的斜交角度有多大,视晶体种类不同而异。

三斜晶系的对称程度最低,只有一个对称中心或只有一个一次旋转轴,三个

结晶轴互不垂直($\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$), 故三斜晶系的光率体的三个主轴与晶体的三个结晶轴斜交, 其斜交角度因晶体而异。

表 1 各晶系与光学性质关系表

	对称	光性
均质体	非晶质、等轴晶系	只有一个折射率值 n (光学上各向同性)。
一轴晶	三、六方晶系、四方晶系	有二个主折射率值: $N_o(\omega)$ 和 $N_e(\varepsilon)$, 一轴晶正光性(+) $N_o < N_e$, 负光性(-) $N_e < N_o$ 。
二轴晶	斜方晶系、单斜晶系、三斜晶系	有三个主折射率: $N_p(\alpha)$ 、 $N_m(\beta)$ 、 $N_g(\gamma)$, 二轴晶正光性(+) $N_g - N_m > N_m - N_p$; 负光性(-) $N_g - N_m < N_m - N_p$ 。

3、正交偏光

在物理学中将太阳光和普通白炽灯光称为自然光, 如在自然光前进的方向上, 设立一个与此方向垂直的平面, 平面内各方向振动的光波称横波。当自然光通过偏光片或尼柯尔棱镜时, 只允许一个方向上振动的光通过, 而这种只在一个方向上振动的光叫平面偏光, 简称偏光。

所谓正交偏光显微镜, 是指光学显微镜含有两个互相垂直的偏光片, 用 **PP** 代表下偏光镜的振动方向, **AA** 代表上偏光镜的振动方向。在使用时除用下偏光镜以外, 再推入上偏光镜, 在载物台上不放任何样品(岩石薄片)时, 此时整个显微镜视域呈完全黑暗。由于自然光通过下偏光镜后, 就成为振动方向平行 **PP**(下偏光镜的振动方向)的偏光, 至上偏光镜时, 因与上偏光镜的振动方向 **AA** 互相垂直, 自然光完全不能透过, 因此整个视域呈现黑暗。

如样品颗粒(岩石薄片)在正交偏光镜间也呈现黑暗的现象, 此称为消光现象。非均质体垂直光轴的切面以外的任何方向切面, 在正交偏光镜间处于消光时的位置, 称为消光位。

在正交偏光镜间, 放置均质体样品或非均质体样品(岩石薄片)中垂直光轴的晶粒, 因这两种样品的光率体切面都是圆切面, 光波垂直这种切面时, 将不产生双折射, 也不改变入射偏光的原有振动方向。因此, 由下偏光镜透射出的振动方

向平行 PP 的偏光，通过样品（岩石薄片）后不改变原有的振动方向，与上偏光镜的振动方向 AA 垂直，故不能透过上偏光镜，因此虽透过晶体（岩石、晶体薄片）仍呈现黑暗(消光)。此时，旋转载物台一周(360 度)过程中，样品（岩石、晶体薄片）的消光现象始终不改变，此称为全消光。

在正交偏光镜下，非均质体样品(岩石、晶体薄片)中其它方向的晶粒，由于这种晶粒的光率体切面为椭圆切面，透过下偏光镜的偏光，射入晶体时，必然要发生双折射，产生振动方向平行光率体椭圆切面长、短半径的两种偏光，即透过下偏光镜的偏光，在光率体的椭圆切面长、短半径方向上进行矢量分解。当光率体的椭圆切面长、短半径与上、下偏光镜的振动方向(AA, PP)一致时，从下偏光镜透射出的振动方向平行 PP 的偏光，可以透过样品而不改变原有的振动方向。当其到达上偏光镜时，因 PP 与 AA 垂直，透不过上偏光镜而使晶粒消光。旋转物台一周过程中，晶体的光率体椭圆半径与上、下偏光镜的振动方向(PP、AA)有四次平行的机会，故岩石薄片这部分颗粒可出现四次消光现象。将岩石薄片放置在正交偏光显微镜视域中，可见到许多不同色彩、不同亮度、不同消光位的晶粒，旋转载物台时，当某些颗粒消光时，而另一些颗粒仍处于明亮的位置，而当消光的颗粒由暗变亮时，其它颗粒则由亮变暗。同样处于明亮状态的颗粒其亮度和颜色可以有所不同，这是由于不同矿物的折射率各不相同，同种矿物的不同颗粒在同一岩石薄片其取向不同所表现出的双折射率和消光方位也各不相同。由此可知：在正交偏光镜间呈现全消光的颗粒样品，可能是均质体矿物，也可能是非均质矿物垂直光轴的切片。而呈现四次消光的颗粒，则一定是非均质体矿物，所以四次消光现象是非均质体的特征。具有一轴晶光性和二轴晶光性的矿物都可以出现四次消光现象，因此不能只通过四次消光现象来确定样品是否属于一轴晶还是二轴晶，需做进一步工作才能确定。

当样品处于消光位时，其光率体的椭圆切面半径，必定与上、下偏光镜的振动方向平行，故据此可以确定岩石薄片颗粒的光率体椭圆半径的位置。

当非均质体样品的光率体椭圆半径 K_1 、 K_2 与上、下偏光镜的振动方向 AA、PP 斜交时(45° 为最佳角度)，透过下偏光镜的振动方向平行 PP 的偏光，进入晶体后，发生双折射，分解成振动方向平行 K_1 、 K_2 的两种偏光。 K_1 、 K_2 的折射率不等，在晶体中的传播速度也不同。根据光学原理可知： K_1 、 K_2 两种偏光在透过

样品的过程中，必然要产生光程差，以 R 表示。此两种偏光存在的光程差 $R = d n_1 - d n_2 = d (n_1 - n_2)$ ，即光程差与晶体的厚度 (d) 和双折射率成正比。而在同一岩石薄片，其厚度通常是一致的，标准厚度为 0.03mm。

当用白光照射时，在正交偏光镜之间随着光程差逐渐增大，视域中出现的干涉色将由低到高出现有规律的变化。这种干涉色的有规律变化，就构成了干涉色级序。干涉色的变化规律如下：一级暗灰色---灰白色---浅黄色---橙色---紫红色---二级蓝色---蓝绿色---绿色---黄色---紫红色---三级蓝绿色---绿色---黄色---橙色---红色---四级粉红色---浅绿色---浅橙色……至亮白色---高级白干涉色。

实验可通过正交偏光显微镜观察晶体的干涉色，在 45° 角时插入石英楔子，使得晶体的干涉色被抵消，然后撤走晶体，参照干涉色色谱表，推断出石英楔子大致的光程差 R ，该光程差即为样品颗粒的光程差。然后通过“双聚焦法”测定晶体颗粒的厚度，就是利用偏光显微镜聚焦的微调选钮，把焦先聚在颗粒的上表面，记录微调选钮的位置 L_1 ，然后把焦聚在颗粒的下表面，记录微调选钮 L_2 （注意记录微调选钮的圈数），再根据微调选钮所转过的总格数（一圈对应 50 格，一格对应 0.002mm）计算样品颗粒的厚度。

五、晶体折射率的测量

1、宝石折射仪的工作原理

光从光密介质(折射率大的介质)进入光疏介质(折射率小的介质)，当入射角达到一定的程度时，折射角就成了直角，此时的入射角被称为临界角。当入射角大于临界角时，光线就不再发生折射而全部反射到原介质内部。显然，临界角的大小与界面两种介质的折射率差有直接的关系。临界角的大小与折射率成反比，也就是说宝石相对空气的折射率越高，临界角越小；反之，折射率越小则临界角越大。当与宝石相接触的介质，如其折射率是已知的，同时又能测定其与宝石间的临界角，此时宝石的折射率也就可以求得。宝石用折射仪正是应用了这一原理：此即所谓全反射折射仪。

宝石折射仪的光学原理是根据测量具有高折射率值的光学玻璃(有时用合成

尖晶石等材料所制)与宝石之间的临界角,就可以测出宝石的折射率值。宝石折射仪主要由玻璃半球工作台、刻度尺、目镜和套在目镜上的偏光片组成。玻璃半球主要由折射率为 1.81 的铅玻璃制成。宝石折射仪的工作原理如图所示。当光线由光密介质铅玻璃半球射到光疏介质宝石磨光平面上,入射角小于临界角的光线在界面处发生折射进入宝石;入射角大于临界角的光线都发生全反射,光线按反射定律返回玻璃半球内,在玻璃半球的右侧形成明区和暗区,在刻度尺相当于临界角的位置上可看到明暗的分界线。临界角的大小与宝石和玻璃半球的折射率有关,因玻璃半球的折射率是已知的,将临界角大小换算成宝石折射率值标定在刻度上,再通过目镜放大,可直接在刻度尺上读出宝石的折射率。

根据全反射原理,折射仪棱镜的光学密度应大于所测宝石的光学密度。总之,棱镜要具有高折射率值,这是首要条件。通常,宝石用折射仪,其棱镜的光学玻璃的折射率可达 1.81。因此,折射率超过 1.81 的宝石,例如金刚石、钛酸锶、锆石、钇铝石榴子石等样品不能用此折射仪测定。

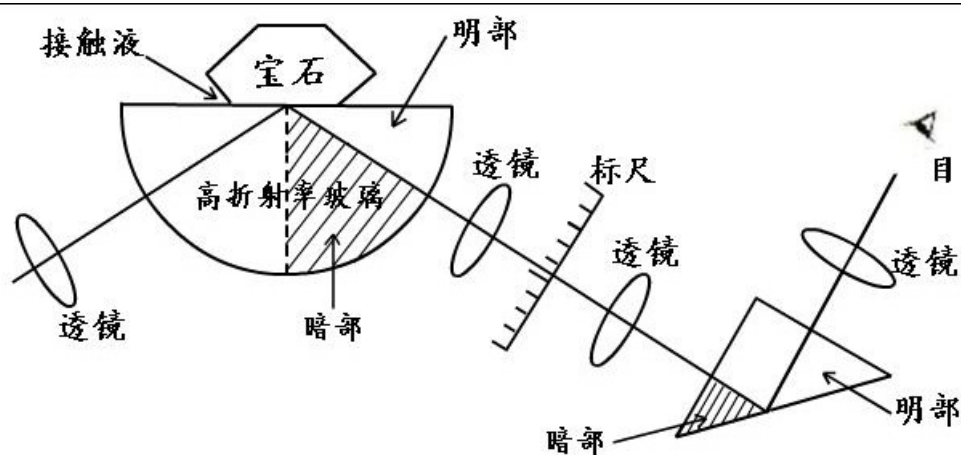


图 宝石折射仪的光学原理示意图(据近山晶, 1992)

为了使棱镜与宝石抛光面完全接触,即为了使二者呈完全的光学接触,进行测定作业时必须在棱镜上滴少量折射率为 1.81 的浸油(接触液)。宝石的表面通过接触液与棱镜紧密接触,是折射率测定的必要条件。

2、单折射、双折射和双折率的测量

(1)、测定的前提条件

该方法测量折射率只要求样品具有一抛光平面,包括不透明样品也都可以测量,同时样品所具有的平面抛光越好,折射率的测量精度也就越高。可测得的折射率下限约为 1.35,上限值约为 1.81。上限值的大小取决于半球棱镜和接触液的折射率,如金刚石棱镜和立方氧化锆棱镜,其测量上限可达 2.0 以上,但需注意的是相应的接触液往往具有非常大的毒性,是十分危险的。

(2)、观察绿色阴影

首先在折射仪的半球棱镜台上滴上一小滴接触液(如四碘乙烯),选用最大且抛光最好的样品平面,并将其表面擦净,然后将待测平面放在该油滴上,慢慢地移至半圆柱体测台的中心,不可使用镊子。采用白光光源,取下目镜不放大,在大约距折射仪隔 30cm 处观察,并将头上下移动,寻找观察与半圆柱测台接触的宝石轮廓的影像及来自标尺上端(低数值端)的绿色暗边,绿色阴影的高数值边即为所测折射率的近似值。折射率超过折射仪极限的样品,在 1.81 读数附近可见阴影或光谱色影。

(3)、测定折射率

当绿色阴影已位于宝石的影像内时,放上目镜放大。阴影边将变为蓝—绿色的窄带,其宽度大约为测尺的两个刻度。读出折射率值,精确到百分位。再换上单色光源 Na 光 D 线(589.3nm)进行精确测定,此时折射率以一灰色窄线或阴影边出现,估测该折射率使之精确到千分位。将偏振片置于目镜上,并来回转动 90°。注意灰色窄边是否移动,略转动测台上的样品,再转动偏振片。若灰色窄边移动了位置,则说明所测样品具双折射。

(4)、测定双折率

使用单色光并放置目镜放大,如有可能将样品的长轴方向平行于测台的长轴方向放置,以便宝石的最大部位与半圆柱体测台相接触。确定阴影边的读数,然后将偏振片来回转动 90°,记下读数的变化(即两个折射率值)。再将宝石转动 15°,转动偏光片并记下高值折射率与低值折射率,继续按上述步骤操作直至样品在测台上转过 180°。单折射样品在测台上旋转达 180° 其折射率读数始终保

持不变。除光轴方向外，具双折射的宝石的任一方向均有两个不同的折射率读数，半圆柱测台测定的是平行于该测台的延长方向和表面的宝石的折射率读数。任何刻面在旋转 180° 的过程中所测得的介于最大与最小读数之间的双折率都可能不同。如果宝石的光轴与所测的刻面垂直，那么在 180° 间的每对读数都是最大双折率。

(5)、注意事项

测完之后应小心地用手指将样品从测台上取下，用面巾纸揩净。测台的硬度很低故很容易被刻划，注意务必用手小心地放上或拿下测台上的样品，切不可使用使用镊子。如长时间不使用折射仪，应在测台上涂一薄层凡士林油以免生锈。折射率读数的精度和可靠性取决于：(a)、样品的抛光质量；(b)、所用接触液的多少，接触液太多会产生一个围绕样品的黑色圈，混淆读数，或使待测样品浮在测台上，此时应用手取下样品，擦净测台，再慢慢地放上样品；(c)、抛光刻面的平整度；(d)、样品是否干净；(e)、半圆柱测台的状态，如测台已遍布擦痕或凹坑，则需要换。(f)、折射仪的标定：用已知折射率的样品来校准——如石英单晶就是很好的标样。(g)、所用的光源类型(单色光或白光)。

(6)、确定轴性与光符

在 X--Y 坐标纸上，以 0 到 180° 为 X 轴，以折射率为 Y 轴，将所测得的十三对读数作图，将所有高值与低值折射率读数分别连接起来，形成两条直线或曲线。

如出现一个折射率值为常数(即为直线)，另一折射率值为变量(即为曲线)，两折射率线有一交点，即为一轴晶的光性特征。如高值折射率为变量，而低值折射率为常数，即为一轴晶正光性；反之，低值折射率为变量，而高值折射率为常数，则为一轴晶负光性。

如两个折射率均为常数，即为两条直线，两折射率的连线无交点，此为一轴晶的光性特征，因样品的光轴与其被测平面垂直所致，此时无法确定光性符号。如两折射率均为变量，即两折射率的连线为曲线，此为二轴晶的光性特征。二轴晶有三个主折射率，分别属于 α (最小值)、 β (中间值)、 γ (最大值)，两曲线的共同值即为 β 值(N_m)。如 β 更接近于低值折射率曲线，则为二轴晶正光性；反之，如 β 更接近于高值折射率曲线，则为二轴晶负光性。如 β 与低、高值折射率曲线等距，

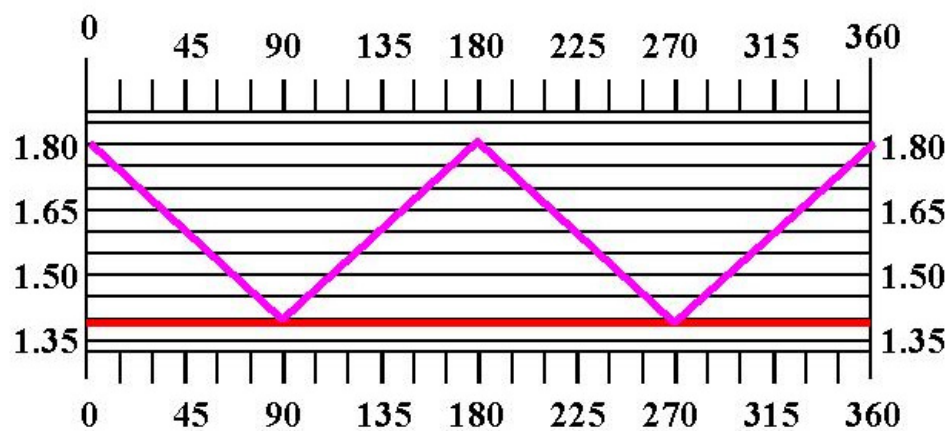
则为二轴晶光符不定。如两曲线无共同的 β 值，即两曲线不相交，此时也属于二轴晶光符不定。

如一折射率是常数而另一折射率是变量，但样品转动 180° 两连线并不相交，则不能确定样品的轴性和光性。

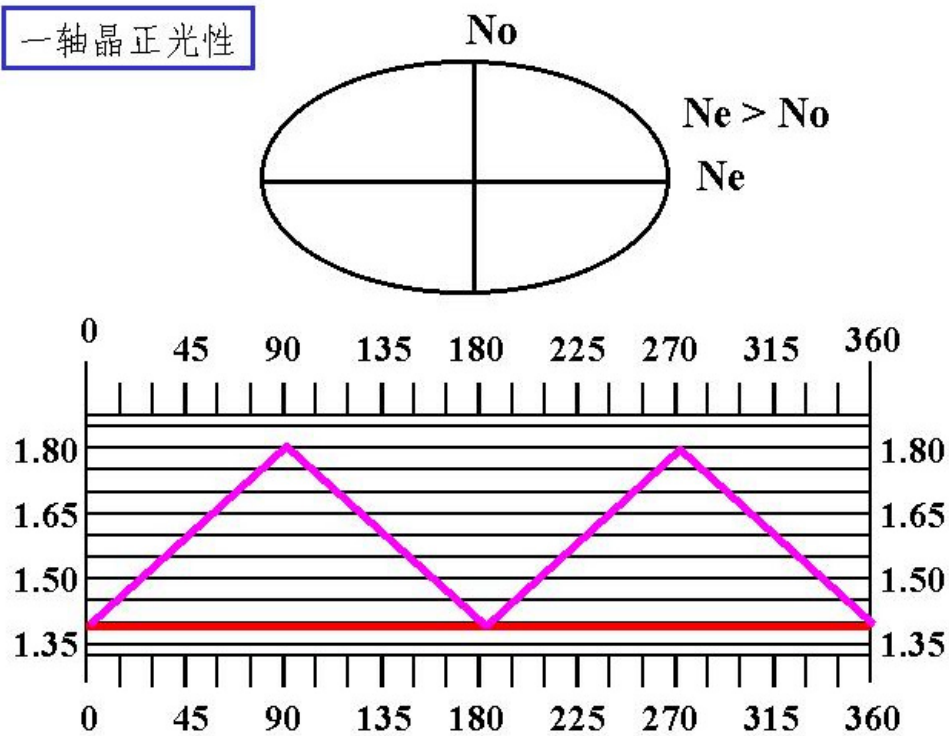
注意事项：对于双折射样品来说，尽管可通过适当旋转样品而在任一刻面上测得最大双折率，但却不能在每一个刻面上测得其轴性和光性。如果某二轴晶样品的光符为非寻常的正或负，如 β 与 α 或 γ 仅差 0.001 或 0.002，此时其图式很容易被误认为一轴晶的图式。有时一轴晶的正常光折射率亦有波动，因而其图式可能会误认为是二轴晶的图式。

一轴晶图式：两个折射率分别属于：正常光(o光，折射率为常数)、非正常光(e光，折射率为变量)。

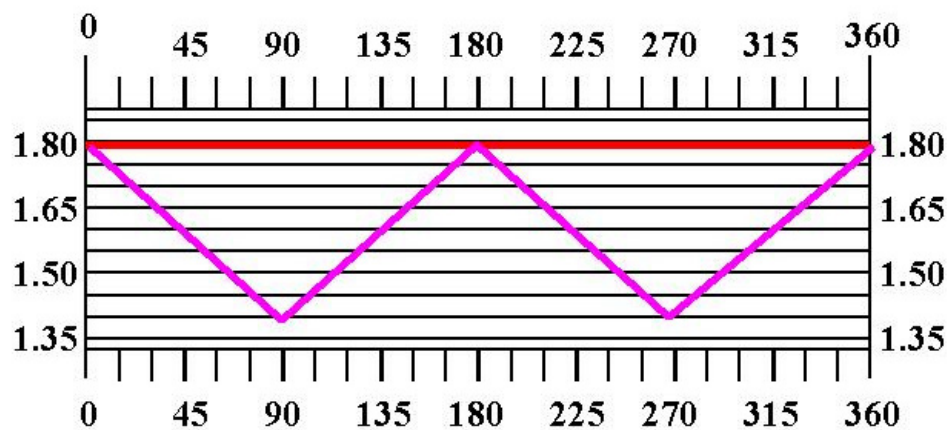
一轴晶正光性：一个折射率值为常数，且为低值折射率(N_o)；另一折射率值为变量，且为高值折射率(N_e')， $N_e' > N_o$ 。两折射率的投影点连线有一交点。



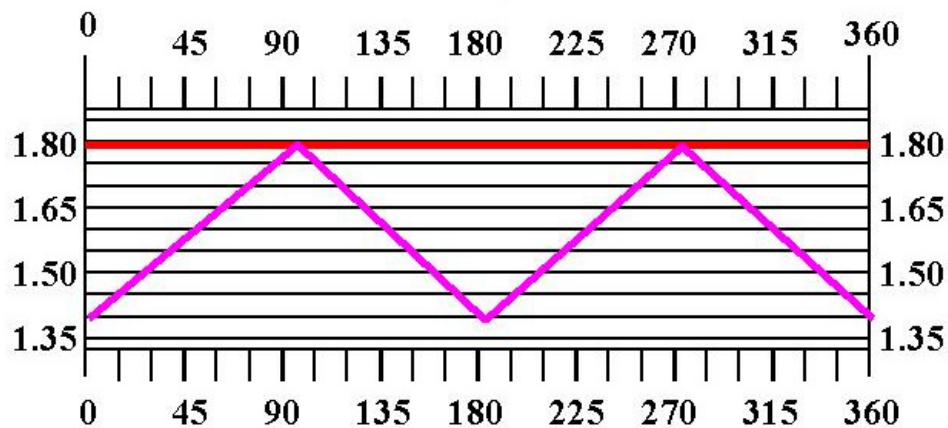
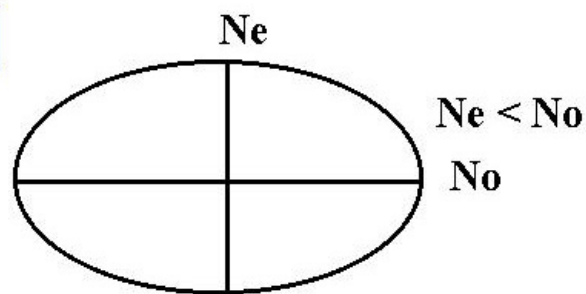
一轴晶正光性



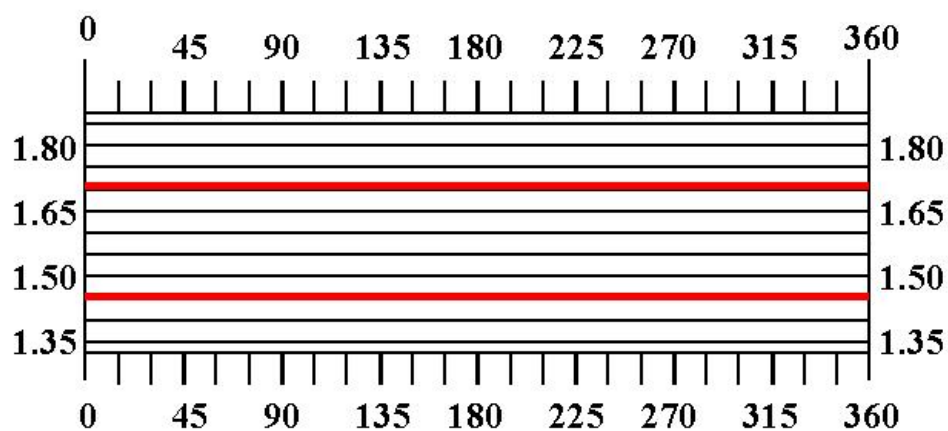
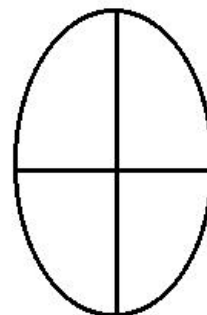
一轴晶负光性：一个折射率值为常数，且为高值折射率(N_o)；另一折射率值为变量，且为低值折射率(N_e')， $N_e' < N_o$ 。两折射率的投影点连线有一交点。



一轴晶负光性

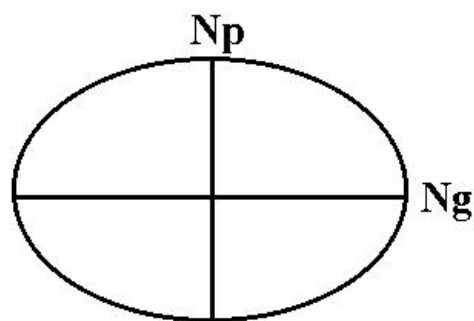
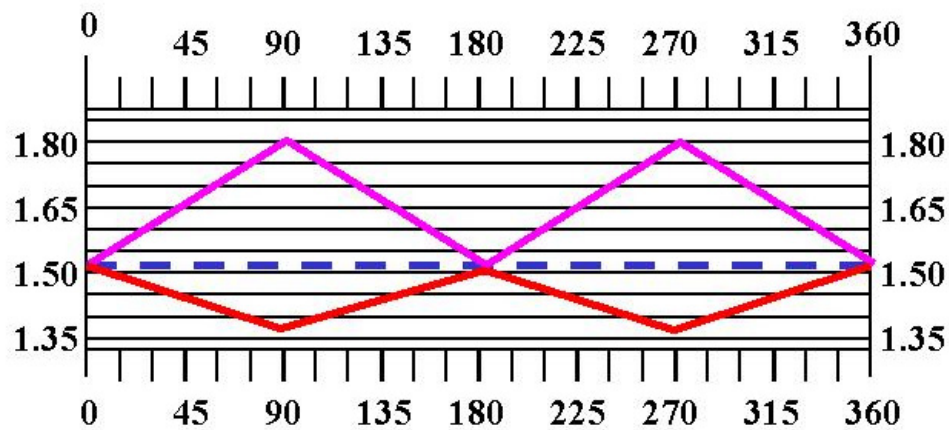


一轴晶(光性未定): 两个折射率值均为常数, 其中一个折射率值为 N_o , 另一折射率值 N_e , 均为主折射率。两折射率的投影点连线无交点。被测样品平面垂直光轴。此时具有最大的双折率(N_e 与 N_o 的差)



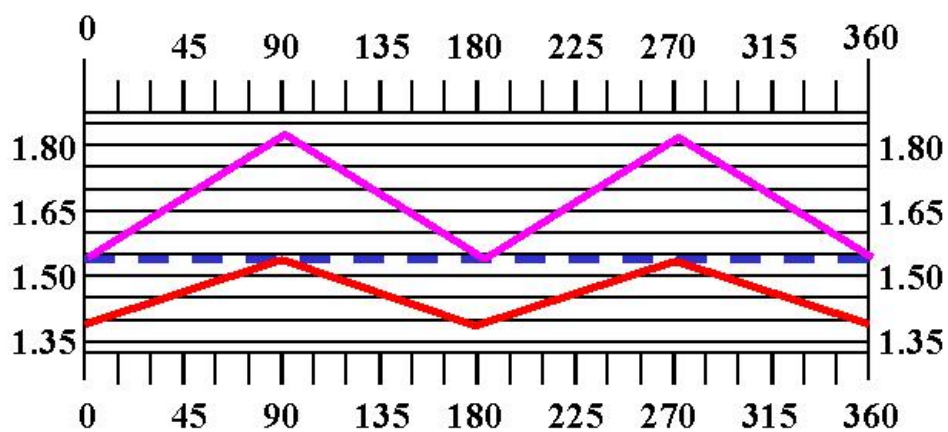
二轴晶图式：三个主折射率分别属于： α (N_p ，低值折射率)、 β (N_m ，中值折射率)、 γ (N_g ，高值折射率)。

二轴晶正光性：两个折射率值均为变量， N_m 值可由 N_g 和 N_p 的值来确定。 $N_g - N_m > N_m - N_p$ 。

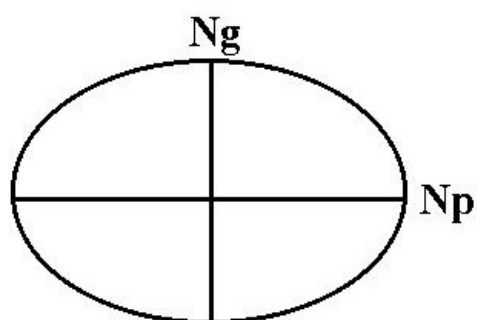
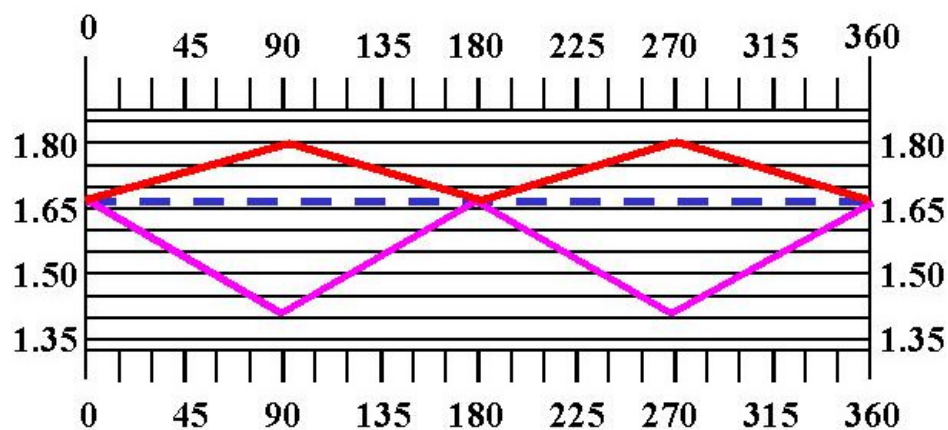


二轴晶正光性：

$$N_g - N_m > N_m - N_p$$

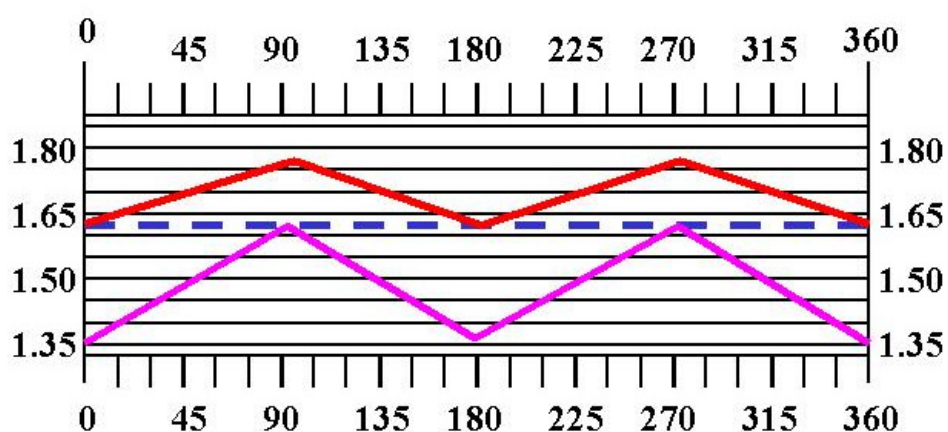


二轴晶负光性：两个折射率值均为变量，Nm值可由Ng和Np的值来确定。 $N_g - N_m < N_m - N_p$ 。

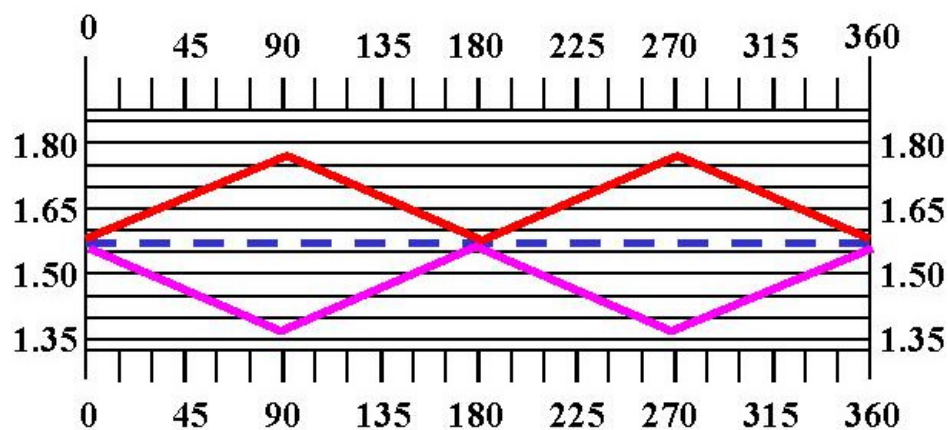


二轴晶负光性：

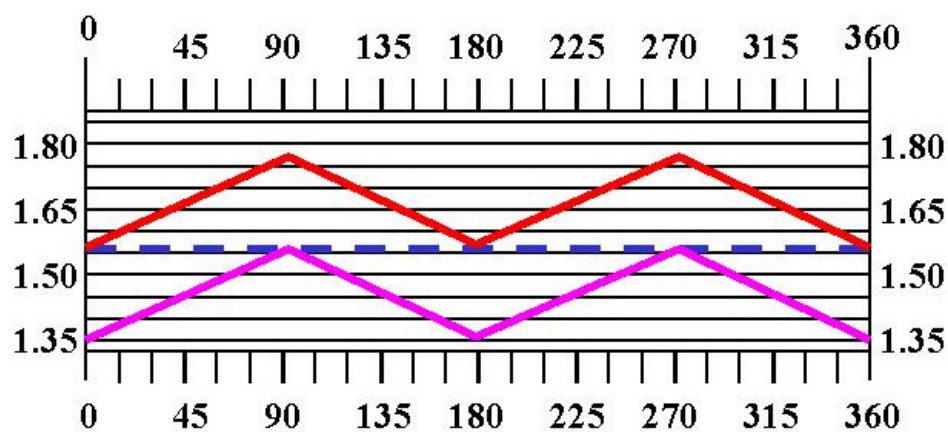
$$N_g - N_m < N_m - N_p$$



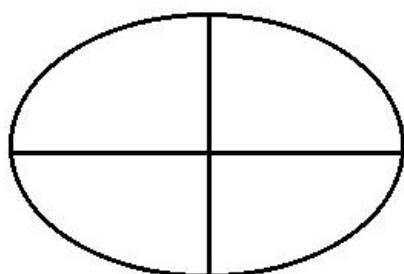
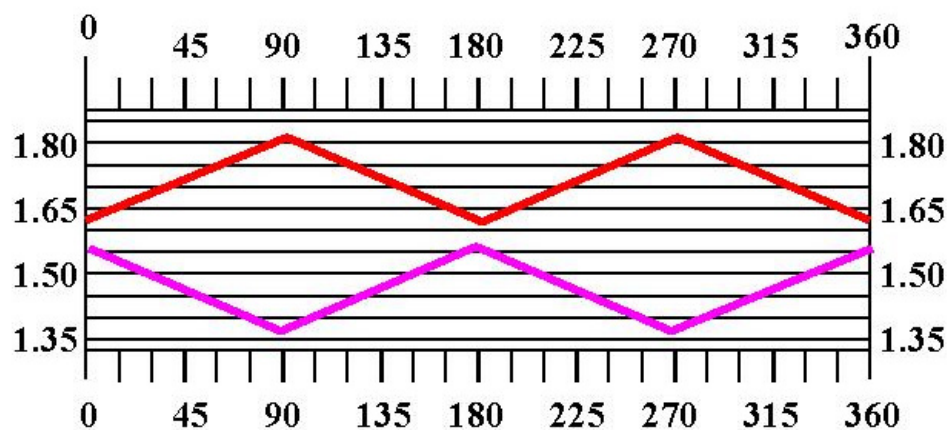
二轴晶无光符：两个折射率值均为变量，Nm值可由Ng和Np的值来确定。 $N_g - N_m = N_m - N_p$ 。



此种图式很少见，仅当出现在2V角为90°时。

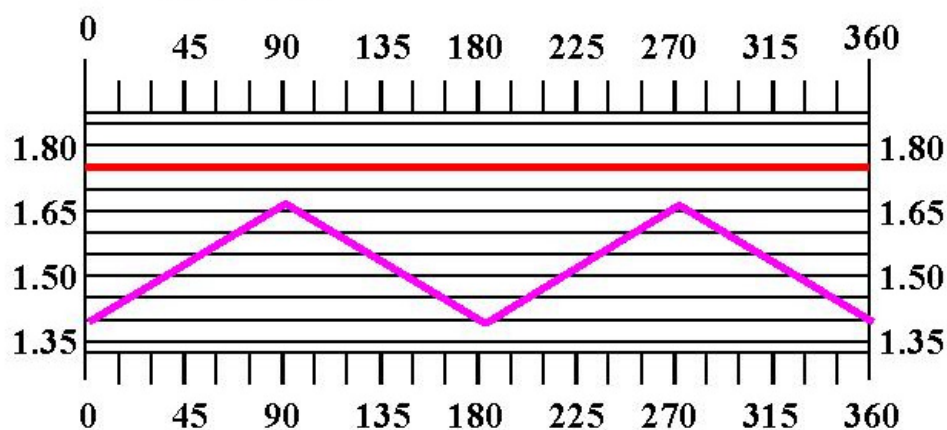


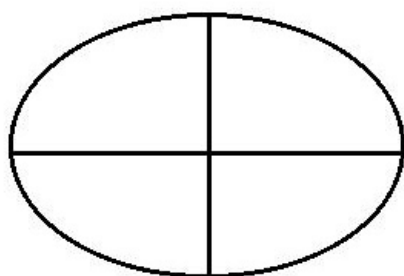
二轴晶(光性未定): 两个折射率值均为变量, N_m 值不能从 N_g 和 N_p 的值来确定。两折射率的投影点连线无交点。



轴性和光符未定:

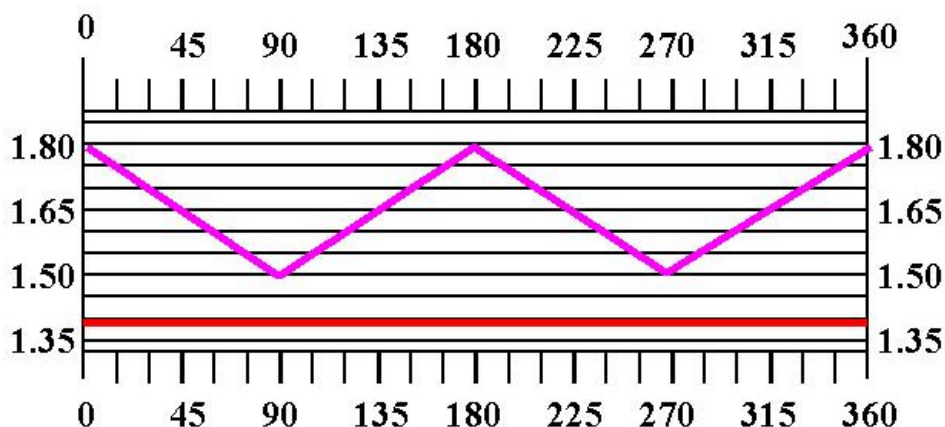
一个折射率值为常数,
另一折射率值为变量,
两折射率的投影点连
线无交点。





轴性和光符未定：

一个折射率值为常数，
另一折射率值为变量，
两折射率的投影点连
线无交点。



六、 样品的制备

为了在透射光下观察晶体的光学性质，样品必须薄到足以使光线能通过，而其强度没有明显的降低。在显微镜下观察透明样品，最简单的制样方法是在玛瑙碾钵中或在两片载玻片间把晶体样品压成小碎片，然后把压碎的晶体碎片集中在载玻片上，上面覆以盖玻璃。进而在盖玻璃边缘滴上一滴浸油，以致毛细管作用将浸油引入盖玻璃之下，并浸没颗粒。这样，研究用的样品就算准备好了。

在地质学中，岩石样品的制备方法如下：首先用金刚石切片从岩石或矿物上切下一小薄片，面积在 $2\sim 3\text{cm}^2$ 左右。然后用研磨料在圆形轮上或磨盘上把薄片的一面磨成光滑平面，然后把薄片已抛光的一面用加拿大树胶粘在显微镜载玻片上，并将其烘干。干燥硬化之后再将另一面磨光，并减薄至厚 $30\mu\text{m}$ (0.03mm) 的矿物薄片，其余均被切掉或磨掉。这极薄的一层矿物在显微镜下可以透过光线，通常在其顶面还要粘上盖玻璃。