

# 高精度双折射晶体定轴测厚仪

杨 还

(中国科学院南京天文仪器厂)

胡岳凤

艾国祥

(中国科学院北京天文台)

## 一、前 言

为研制透过带为 $0.12-0.15 \text{ \AA}$ 窄带双折射滤光器,要求双折射晶片的光程差的偏差小于 $\frac{1}{200}$ 波长,晶体光轴定向误差小于 $2'$ 。而以往用常规仪器测定,厚度偏差只能达到 $\frac{1}{50}$ 波长,定向误差约 $5'$ 。为此,我们研制了高精度双折射晶体定轴测厚仪。本仪器用来测量晶体厚度、晶轴的方位角及晶体材料的双折射率( $\mu$ 值)。测厚精度达 $\frac{1}{1000}$ 波长,定轴精度优于 $1'$ , $\mu$ 值可定准到 $5 \times 10^{-6}$ ,测试数据稳定可靠。

## 二、仪器的测量原理及精度

### 1. 晶体测厚原理及精度

在两平行或正交的偏振片之间,放一片双折射晶体 $b$ (图1),其晶轴躺在通光面上,且与偏振轴成 $45^\circ$ 夹角。光束通过双折射晶体后,o光和e光之间有光程差 $\sigma$ 为:

$$\sigma = 2\pi n = 2\pi \cdot \frac{\mu d}{\lambda} \quad (1)$$

式中: $n$ —滞后期, $\mu$ —双折射率。

$d$ —晶体厚度, $\lambda$ —透过波长。当偏振轴平行或正交时,光的透过率分别为:

$$\tau_{\parallel} = \cos^2\left(\pi \cdot \frac{\mu d}{\lambda}\right) \quad (2)$$

$$\tau_{\perp} = \sin^2\left(\pi \cdot \frac{\mu d}{\lambda}\right) \quad (3)$$

本仪器基于暗视场测量。当要求被测晶体光程差为工作波长的整数倍时,应将仪器置于 $P_2 \perp P_1$ ,按式(3),透过光量为极小值。而若要求晶体光程差为半波长的奇数倍时,则将仪器置于 $P_2 \parallel P_1$ ,按式(2),透过光量为极小值。当晶体尚未磨到应有的滞后期数时,呈亮视场。为了测定晶体厚度偏差值,在 $P_1$ 、 $P_2$ 之间再插入补偿器 $S$ 。 $S$ 的晶轴方向应与晶体 $b$ 的晶轴平行(图2)。此时透过光量为:

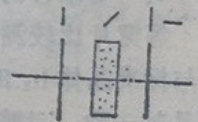


图 1

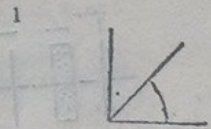
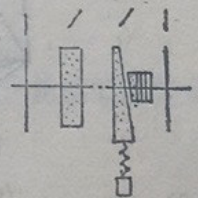


图 2



(4)

$$\tau_{\parallel} = \cos^2\left(\frac{\sigma_b + \sigma_s}{2}\right)$$

(5)

$$\tau_{\perp} = \sin^2\left(\frac{\sigma_b + \sigma_s}{2}\right)$$

移动补偿器S(即改变光程差 $\sigma_s$ ),当透过光量为极小值时,补偿器相对于零点的移动量即为晶体的厚度偏差值。从式(1)可知,光程差 $\sigma$ 与晶体厚度及波长有关。故测定晶体厚度时,须用相应波长的单色光源并用恒温箱加温被测晶体至滤光器的工作温度。本仪器偏振片正交时,透光量为 $10^{-6}$ 量级。在两片偏振片间插入晶体b后,如果其透过光量不变,说明该晶片的厚度偏差 $\Delta n$ 接近 $\frac{1}{1000}$ 波长。由于透光量极小值附近存在一个不灵敏区,实测中采用等偏离法避开不灵敏区,故实测精度可达 $\frac{1}{1000}$ 波长。

## 2. 晶轴方位的测定及其精度(图3)

图中 $\Delta\psi$ 为晶轴与偏振轴的偏差角,透过光量为:

$$\tau_{\psi} = \sin^2(2 \cdot \Delta\psi)$$

(6)

$$\frac{d\tau_{\psi}}{d\psi} = 2\sin(4 \cdot \Delta\psi)$$

(7)

由式(6)、(7)可知,当 $\Delta\psi = \pm(0-15)'$ 时, $\tau_{\psi}$ 很小, $d\tau_{d\psi=1}'$ 很小。当 $\Delta\psi = \pm(15-30)'$ 时, $\tau_{\psi}$ 、 $d\tau_{d\psi=1}'$ 都明显增大。故测量时应避开不灵敏区,以提高测量灵敏度。晶轴定向精度可达 $1'$ 。

## 3. 晶体材料双折射率的测定

由式(1)可得 $\mu = \frac{\sigma}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{d}$ ,因 $\mu$ 是温度和波长的函数,故应在单色光和恒温条件下测定。 $\mu$ 值的测量精度为 $5 \times 10^{-6}$ 。

## 4. 等厚片的比较测量

等宽片比较测量的优点在于测量时不需要单色光和恒温条件。图4为测量简图。待测晶体 $b_1$ 与标准晶体 $b_2$ 的晶轴应正交,且与正交的偏振轴夹角为 $45^\circ$ ,补偿器的晶轴应与待测晶体的晶轴一致。呈暗视场时的补偿量 $\sigma_s$ 即为晶体的厚度偏差。



图3

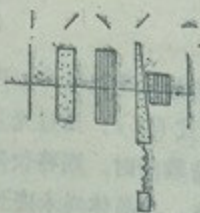


图4

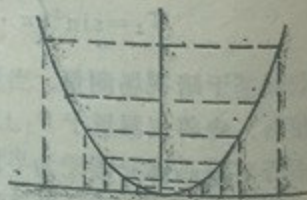


图5

### 三、等偏离求极小值法（以下简称等偏离法）

据式(6)、(7)计算出不同 $\Delta\psi$ 值下的透光量 $\tau_n$ ，及当 $d\psi=1'$ 时透光量的变化值 $d\tau_n$ ，列于表1。并绘出 $\tau_n-\Delta\psi$ 曲线(图5)。由图5可见，当取 $\Delta\psi=\pm(20-30)'$ 时，可提高测量灵敏度。

表1

$\Delta\psi$	6'	10'	15'	20'	30'	1°
$\tau_n$	$1.2 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-5}$	$7.6 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$
$d\tau_n$	$0.406 \times 10^{-5}$	$0.675 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$	$2.03 \times 10^{-5}$	$4.06 \times 10^{-5}$

设 $\psi$ 为晶轴方位角(图3)，则晶台转过 $\psi$ 角，晶轴与偏振轴平行，呈暗视场。实测时，先将晶台转过 $\psi_b$ ，记下微安表读数A，然后继续转动晶台的待微安表读数由A下降而后又回升到A值时，记下晶台转角 $\psi_a$ 。则 $\psi = \frac{\psi_a + \psi_b}{2}$ 。在测量晶体厚度偏差时也采用同上的等偏离法。按式：

$$\tau_n = \sin^2(\pi \cdot \Delta n) \quad (8)$$

$$d\tau_n = \pi \cdot \sin(2\pi \cdot \Delta n) \cdot dn \quad (9)$$

取 $dn = \frac{1}{1000}$ 波长，计算值列于表2。并绘出 $\tau_n-\Delta n$ 曲线(图6)。实测

时，设 $\sigma_s$ 为应有的补偿量，则可先补偿 $\sigma_A$ ，记下微安表读数A，然后继续移动补偿器，待微安表读数由A下降而后又回升到A值时，

记下补偿器的补偿量 $\sigma_B$ 。则晶体的厚度偏差为 $\sigma_s = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2}$ 。

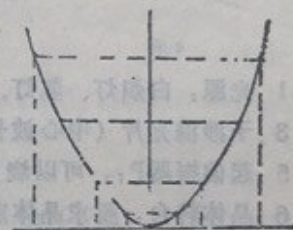


图6

表 2

$\Delta n$	1/1000	1/500	1/200	1/100
$\tau_n$	$9.87 \times 10^{-6}$	$3.95 \times 10^{-5}$	$2.47 \times 10^{-4}$	$9.84 \times 10^{-4}$
$d\tau_n$	$1.97 \times 10^{-5}$	$3.95 \times 10^{-5}$	$9.87 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-4}$

### 四、索列尔补偿器

索列尔补偿器由两块楔角相等、晶轴方向相同的楔形石英晶体A、B及一块晶轴方向垂直于前者的方形石英晶体C所组成(图7)。按式(1)，其补偿为：

$$\sigma_s = 2\pi \cdot \frac{\mu (d_A + d_B - d_C)}{\lambda}$$

该补偿器在通光面内各点的补偿量均相等。要求各晶体的晶轴对工作面G的不平行度 $<1'$ ，晶体C的晶轴对晶体A、B的晶轴的不垂直度 $<1'$ 。补偿器的移动范围为24毫米，对应补偿范围为 $+\frac{\lambda}{4}$ —— $-\frac{3}{4}\lambda$ 。对应于一个光程差的晶体厚度 $d\lambda = \frac{\lambda}{\mu} = 72.76$ 微米。晶体楔角为 $\alpha = \frac{72.76}{24} = 3$ 微米/1毫米 $= 10'25''$ 。补偿器每移动1毫米，相当于补偿厚度为3微米。测微读数器的最小读值为0.01毫米，相当于 $\frac{1}{2000}$ 波长。

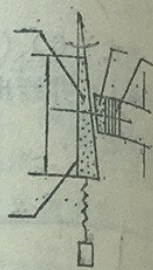


图7

### 五、仪器的组成 (图8)

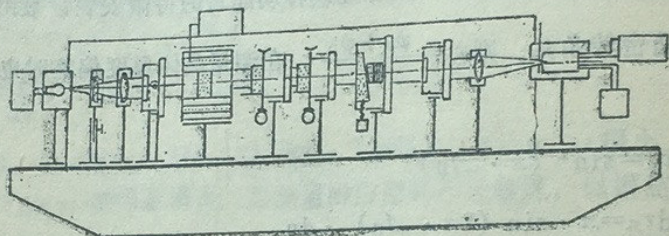


图8

1. 光源：白炽灯、氢灯。
2. 小孔光阑。
3. 干涉滤光片 (中心波长为 $\lambda$ )。
4. 准直镜。
5. 起偏振器 $P_1$ ：可以绕几何光轴回转，度盘最小格值为 $1'$ ，并能绕水平轴翻转 $180^\circ$ 。
6. 晶体转台：要求晶体定位面垂直于几何光轴，误差 $1'$ 。转台回转的最小格值为 $1'$ 。
7. 恒温箱：内筒 $40 \times 40 \times 150$ 毫米，工作温度为 $(32-47)^\circ\text{C}$  (可调)，恒温 $\pm \left(\frac{1}{20}\right)^\circ\text{C}$ 。被测晶体放入内筒后，应保证晶体工作面与几何光轴垂直，误差 $<1'$ ，晶体底边应处于水平位置。
8. 补偿器：(a. 校准晶体工作面与几何光轴垂直，误差 $<1'$ 。b. 能绕几何光轴回转，最小格值为 $1'$ 。c. 横向移动最小格值为0.01毫米。)
9. 检偏振器 $P_2$ ：可以绕几何光轴回转，度盘最小格值为 $1'$ 。
10. 成像镜。
11. 接收器：光电倍增管、微安表。
12. 电器装置：(a. 高压电源。b. 稳压电源。c. 霓虹灯变压器。d. 恒温控制器。)
13. 光具座、遮光罩。

## 六、仪器的调整

1. 用测角仪及标准平面平行玻璃板校正图8中6、7、8上的晶体定位面，使与几何光轴垂直。

2.  $P_1$ 、 $P_2$ 偏振方向的调整(图9),转动 $P_1$ 至 $P_{10}$ 位置,视场变暗,然后将 $P_1$ 翻转 $180^\circ$ ,视场变亮,记下此时 $P_1$ 度盘上的初格值。再转动 $P_1$ ,使视场变暗,记下 $P_1$ 度盘上的新格值。将新格值减去初格值,即为 $P_1$ 的回转角 $\alpha$ 。再将 $P_1$ 、 $P_2$ 各反转 $\frac{\alpha}{2}$ 角,获得 $P_1$ 、 $P_2$ 的新位置 $P_{11}$ 、 $P_{21}$ 。如此反复数次,即可使 $P_1$ 的偏振轴置于水平方向, $P_2$ 的偏振轴置于垂直方向。

3. 晶台台面零位的调整:将偏振方向为 $45^\circ$ 的偏振片放在晶台台面上,转动晶台至暗视场时,记下晶台度盘的格值 $a$ 。然后将该偏振片的底边在晶台台面内转 $180^\circ$ ,再转动晶台至暗视场时,记下度盘格值 $b$ 。则将晶台调至 $(\frac{a+b}{2})$ 刻值时,即为晶台台面的零点位置。

4. 补偿器的定标:设 $P_1$ 的偏振轴在水平位置, $P_2 \perp P_1$ ,则将补偿器绕何几光轴回转,当其晶轴方向与偏振轴平行时,呈暗视场,此时补偿器的度盘即已调整到零位。然后再将补偿器转 $45^\circ$ ,并旋转测微器,呈暗视场时,记下测微器的格值 $X_0$ ,即为补偿器的零位。为了标定 $\frac{\lambda}{2}$ 补偿量的位置,应调正 $P_2$ ,使 $P_2 \parallel P_1$ ,再旋转测微器,呈暗视场时,记下格值 $X_{\frac{\lambda}{2}}$ ,即为补偿 $\frac{\lambda}{2}$ 的位置。

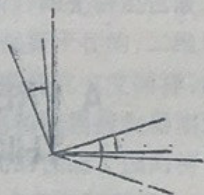


图9

## 七、实测数据的处理

令 $Y$ 代表晶体的厚度偏差值, $X$ 为呈暗视场时补偿器的读数,则

$$Y_{\text{石英晶体}} = \frac{d\lambda}{2} \cdot \left( \frac{X - X_0}{X_{\frac{\lambda}{2}} - X_0} \right) \quad (10)$$

$$Y_{\text{冰洲石晶体}} = \frac{d\lambda}{2} \cdot \left( \frac{X - X_0}{X_{\frac{\lambda}{2}} - X_0} \right) \cdot \frac{\mu_{\text{石英}}}{\mu_{\text{冰洲石}}} \quad (11)$$

式中  $d\lambda = \frac{\lambda}{\mu_{\text{石英}}} = \frac{0.6563}{0.00902} = 72.75 \text{ 微米}$

## 八、实测范例

要求晶体厚度偏差为 $-0.27$ 微米,实测结果列于表3。由表3可见,厚度偏差已可控制在 $\pm 0.01$ 微米范围内,此值即为仪器的测量精度。

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$
-0.27	-0.27	-0.28	-0.27	-0.26	-0.27	-0.28	-0.28

## 九. 结束语

本仪器为国内首创，仪器精度极高且稳定可靠，国外也未见有能获更高精度的报导<sup>(1)</sup>。自1976年制成仪器以来，我厂已成功地利用它研制出多台不同透过波长的双折射滤光器。检测结果表明，滤光器散射光很低，光谱分辨率可达 $0.12 \text{ \AA}$ 。

## 参 考 文 献

- (1) Smarrrt, R. N. and Steel, W. H., J. Opt. Soc. Amer., 49, 7, (1959) 710.

# A PRECISE INSTRUMENT FOR MEASURING THE THICKNESS AND THE AXIS POSITION OF BIREFRINGENT CRYSTAL

Yang Huan

(Nanjing Astronomical Instrument Factory)

Hu Yuefeng, Ai Guoxiang

(Beijing Observatory)

In this paper we describe the principle, the structure, the measuring method and accuracy of an instrument for determining the thickness and axis position of birefringent crystal, in which a Soleil compensator is used for detecting the small path-difference of crystal.

In order to improve the measuring accuracy, the equal-deviation method has to be adopted. Using the instrument, one can measure the crystal thickness with accuracy of  $\lambda/1000$ , the axis position better than  $1'$  and the birefringence about  $5 \cdot 10^{-5}$ . Their measuring results are stable and reliable.

This instrument was successfully applied for producing several birefringent filters including the high-quality one coupled with the 35cm solar telescope.