

## 与消光式兼容的光度椭偏仪的原理

吴启宏  
(浙江大学光仪系)

### 提 要

在 PQSA 式消光型椭偏仪基础上,把原来方位固定的  $1/4$  波片改为旋转波片就可以构成与消光式兼容的新型光度椭偏仪。本文讨论了这种光度椭偏仪的工作原理和计算公式。理论分析指出,这是一种完全的椭偏仪,能唯一地确定  $\Delta$  的符号,并在测量线偏光的  $\Delta$  时精度不会下降。文中还报告了进行原理性实验的结果。

关键词: 椭偏术。

消光式椭偏仪和光度式椭偏仪是现代椭偏仪的主要型式,它们各有优缺点。消光式椭偏仪虽然测量速度较慢,但是如果采取 4 个区域读数,仪器的各种系统误差被消除至最小, $\Delta$ ,  $\Psi$  值可以具有很高的准确度,适合于精密测量<sup>[1]</sup>。光度式椭偏仪虽然准确度不如消光式。但是测量速度很快,便于鉴别表面和薄膜的快速变化过程,用途越来越广泛<sup>[2]</sup>。这两种椭偏仪的性能互相补充,能胜任各种不同场合下的  $\Delta$ ,  $\Psi$  测量。

消光式椭偏仪的主要型式是 PQSA 式。在这种型式中,光线依次经过起偏器,  $1/4$  波片,待测样品和检偏器,最后达到光电接收器。与其它型式的消光式椭偏仪相比(如 PSQA 型式),PQSA 式在调节消光时比较迅速、方便。故绝大部分商品椭偏仪都是该种型式。光度式椭偏仪中,旋转元件式椭偏仪由于结构简单,测量速度为每秒一次或几次,可以满足一般的快速测量需要,得到了广泛的应用。但是典型的旋转检偏器式(如 Gaertner 公司的 L116A 型)或旋转  $1/4$  波片式,旋转元件均在样品以后的光路中,与 PQSA 消光式椭偏仪的光路无法一致。国外也尚无见到光度式和消光式兼容的椭偏仪商品。为了开发我国的自动椭偏仪的品种,设计一种与 PQSA 消光式兼容的自动椭偏仪有很大的意义。该仪器既能作为消光式椭偏仪进行精密测量,也可以作为自动椭偏仪进行快速测量。另外便于以较低的代价对国内大量使用的消光式椭偏仪进行自动化改造,推动我国椭偏术的发展。本文将讨论这种新型仪器的基本原理。

考虑到兼容性,新仪器的光路必须是 P-Q-S-A 型式。由于旋转检偏器时,只能构成不完全的椭偏仪,不能测定  $\Delta$  的正负,并且对线偏振光的  $\Delta$  测量有很大误差;而旋转波片时则能消除上述缺点而构成完全的椭偏仪<sup>[3]</sup>。我们把原来消光式椭偏仪中方位固定的  $1/4$  波片改为旋转元件,构成光度式椭偏仪。

在采用光度式方式测量时,原来方位可调的起偏器固定在  $+45^\circ$  方位,以产生幅度相等的  $P$  和  $S$  两个分量。原来方位可调的检偏器也应固定在  $+45^\circ$  方位,一方面保证光电接收器接收到偏振方向固定的光线,另一方面采用  $45^\circ$  方位使  $P$ 、 $S$  两个方位的偏振光均能被

光电接收器接收。这种兼容式仪器的基本计算公式推导如下:

由于起偏器  $P$  在  $45^\circ$  方位, 经过  $P$  后的  $p$  分量和  $s$  分量幅度相等, 不妨假定为 1。接着光线通过旋转的  $1/4$  波片  $Q$ , 设波片的快轴与椭偏仪  $p$  分量之间的夹角为  $C$ , 从图 1 中可以得到波片快轴和慢轴上的分量  $E_F$  和  $E_S$  分别为:

$$E_F = \cos C + \sin C, \quad E_S = (\cos C - \sin C) \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

式中  $e^{-j\frac{\pi}{2}}$  表示  $E_S$  落后于  $E_F$   $90^\circ$ 。

把  $E_F$  和  $E_S$  再投影到  $p$  分量和  $s$  分量, 得到  $E_{p_1}$  和  $E_{s_1}$ :

$$E_{p_1} = E_F \cdot \cos C - E_S \sin C, \quad E_{s_1} = E_F \cdot \sin C + E_S \cdot \cos C。$$

当光线由样品反射后, 由于样品对  $p$  分量和  $s$  分量的反射系数的模为  $a_1, a_2$ , 它们之间的相位差为  $\Delta$ 。光强变为  $E_{p_2}$  和  $E_{s_2}$ :

$$E_{p_2} = E_{p_1} \times a_1 \cdot e^{j\Delta}, \quad E_{s_2} = E_{s_1} \times a_2。$$

最后, 经过固定检偏器 (通光方法为  $+45^\circ$ ) 成为线偏振光  $E_3$

$$\begin{aligned} E_3 &= \frac{\sqrt{2}}{2} (E_{p_2} + E_{s_2}) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} [a_1 \cdot e^{j\Delta} (E_F \cdot \cos C - E_S \sin C) + a_2 (E_F \sin C + E_S \cdot \cos C)]。 \end{aligned}$$

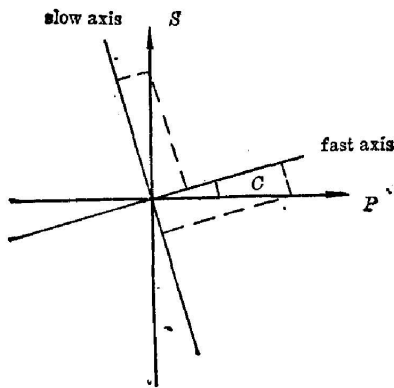


Fig. 1 Scheme of azimuth of quarterwave plate

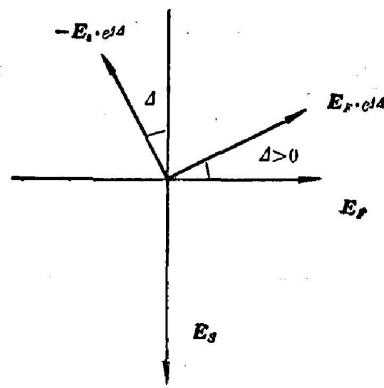


Fig. 2 Relationship between light vectors

根据图 2 所示的相位关系, 把  $E_3$  改写成标量式, 我们得到进入光电接收器的光强  $I$  为:

$$\begin{aligned} I = |E_3|^2 &= [a_2 \sin C E_F + a_1 \cos C E_F \cdot \cos \Delta - a_1 \sin C \sin \Delta \cdot E_S]^2 \\ &+ [a_2 \cos C E_S - a_1 \cos C E_F \cdot \sin \Delta - a_1 \sin C \cos \Delta \cdot E_S]^2。 \end{aligned}$$

利用三角函数降幂公式, 上式可以化简为:

$$\begin{aligned} I &= a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 \cos \Delta + \frac{1}{2} (a_1^2 - a_2^2) \sin 4C - a_1 a_2 \cos \Delta \cos 4C \\ &- 2a_1 a_2 \sin \Delta \cos 2C。 \end{aligned}$$

用  $A_n$  和  $B_n$  表示光强表达式中各余弦和正弦谐波分量的系数。从上式我们得到,

$$A_0 = a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 \cos \Delta, \quad A_2 = -2a_1 a_2 \sin \Delta,$$

$$A_4 = -a_1 a_2 \cos \Delta, \quad B_4 = \frac{1}{2}(a_1^2 - a_2^2).$$

引用斯托克斯参量

$$\begin{aligned} S_0 &= a_1^2 + a_2^2, & S_1 &= a_1^2 - a_2^2, \\ S_2 &= 2a_1 a_2 \cos \Delta, & S_3 &= -2a_1 a_2 \sin \Delta, \end{aligned}$$

我们得到 PQSA 式自动椭偏仪的主要公式:

$$S_1 = 2B_4, \quad S_2 = -2A_4, \quad S_3 = A_{20}.$$

样品的椭偏函数  $\Delta$ 、 $\Psi$  可以从下列公式中计算得到:

$$\Psi = \arctg \left( (S_2^2 + S_3^2)^{\frac{1}{2}} / (-S_1) \right), \quad \Delta = \arctg (-S_3 / S_2).$$

从上述推导中可知, PQSA 式自动椭偏仪在一次测量中可以得到  $S_2$  和  $S_3$  的信息, 能唯一地确定  $\Delta$  的正负, 属于一种完全的椭偏仪。

其次分析是存在  $\Delta$  测量精度极差的情况。典型的旋转检偏器式光度椭偏仪, 对线偏振光 ( $\Delta=0$ ) 的  $\Delta$  测量精度极差, 给实际使用造成许多困难。当我们从光强数据的变化来计算  $\Delta$  时,  $\Delta$  的精度决定于  $\partial\Delta/\partial I$ , 但是  $\partial\Delta/\partial I$  写成解析表达式比较困难, 故分析十分复杂<sup>[3]</sup>。我们采用另一种方法, 即借助于  $\partial I/\partial\Delta$  的值来分析  $\Delta$  的测量误差。理由是  $\partial I/\partial\Delta$  值较大, 意味着  $\Delta$  稍有改变, 光强就有较大的变化。反过来, 对于一定的光强测量精度, 从光强推算  $\Delta$  时,  $\Delta$  的精度就会较高。如果  $\partial I/\partial\Delta \rightarrow 0$ , 那么  $\Delta$  即使改变很大, 光强仍无明显变化, 从光强变化计算  $\Delta$  时, 其精度必然很差。

从上述光强  $I$  的表达式中我们可以得到:

$$\begin{aligned} \partial I/\partial\Delta &= 2(-a_1 \cos C E_F \cdot \sin \Delta - a_1 \sin C \cos \Delta E_s) \\ &\quad \cdot (a_2 \sin C \cdot E_F + a_1 \cos C E_F \cdot \cos \Delta - a_1 \sin C \sin \Delta E_s) \\ &\quad + 2(-a_1 \cos C E_F \cos \Delta + a_1 \sin C \sin \Delta E_s) \\ &\quad \cdot (a_2 \cos C \cdot E_s - a_1 \cos C \cdot E_F \cdot \sin \Delta - a_1 \sin C \cos \Delta E_s). \end{aligned}$$

从上式中可以看到,  $\Delta$  不论为何值,  $\partial I/\partial\Delta$  始终不为零, 这就表明在测量中不存在  $\Delta$  测量精度极差的情况。

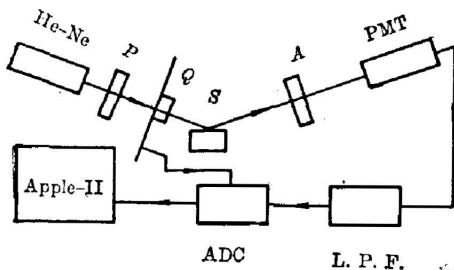


Fig. 3 Experimental set-up

我们对兼容式 PQSA 型光度自动椭偏仪进行了原理性实验, 实验装置如图 3 所示。He-Ne 激光依次经过起偏器  $P$ , 旋转  $1/4$  波片, 样品和检偏器  $A$ , 到达光电倍增管。入射角选为  $70^\circ$ 。作为消光式使用时, 旋转  $1/4$  波片的快轴方位调整在  $45^\circ$ , 靠调节起偏器和检偏器达到消光状态。作为光度自动椭偏仪使用时, 起偏器和检偏器的通光方位均调整在  $45^\circ$ 。旋转  $1/4$  波片由小伺服电机通过机械减速机构带动, 转速为  $1 \text{ rpm}$ 。

波片的轴上装有编码盘, 每隔  $18^\circ$  (精度为  $0.02^\circ$ ) 输出一个同步脉冲送至 Apple-II 计算机, 以控制模数转换器采样。光电信号经过低通滤波器滤波后, 输入八位模数转换器 ADC 0809。光电信号的噪声控制在  $15 \text{ mV}$  以下, 相当于经模数变换后的十进制信号值的波动不超过一个末位数字。 $1/4$  波片每转过  $18^\circ$ , 计算机采集一次光强信号  $\pm \delta$ , 并及时通过下列公式先计算出各项傅里叶系数:

$$A_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \times \cos(nc), \quad B_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \times \sin(nc), \quad N = 20。$$

然后用前文所推公式计算斯托克斯参量和偏振参数  $\Delta, \psi$ , 最后在计算机屏幕上实时显示出  $\Delta, \psi$  值。每个测量周期历时 1 秒, 包括采样, 计算, 显示三个过程。

我们对一系列  $\Delta, \psi$  不同的样品进行实际测量, 并与消光式 Tp-77 型椭偏仪的测量结果作了对比。表 1 是包括空白  $K_9$  玻璃 ( $\Delta \approx 0$  的样品) 在内的三块典型样品的测量结果。

表 1 的数据表明, PQSA 兼容式光度椭偏仪的  $\Delta, \psi$  测量值与 Tp-77 型椭偏仪的测试结果合理地符合。在  $\Delta=0$  处 ( $K_9$  玻璃)  $\Delta$  的测量精度不存在低落的现象, 与理论分析结果一致。

光度测量的精度目前尚明显低于消光式的测量精度。我们估计, 将采样点数增加到 72 点, 光电信号的噪声压低至 2mV, 然后配用 12 位模数转换器, 那么  $\Delta, \psi$  的测量精度将优于  $0.05^\circ$ 。

Table 1 Experimental results of the compatible ellipsometer

Sample	Tp-77		Compatible ellipsometer			
	$\psi$	$\Delta$	$\psi$	$\sigma_{n-1}$	$\Delta$	$\sigma_{n-1}$
$K_9$ Glass	19.60	0.80	19.6	0.28	-0.02	0.38
Sample I	11.37	-37.88	11.5	0.13	-32.2	0.33
Sample II	5.48	-147.46	5.3	0.21	-148.6	0.36

### 参 考 文 献

- [1] R. M. A. Azzam et al.; «Ellipsometry and Polarized Light», (North-Holland, Amsterdam, 1977), ch. 3.  
 [2] D. E. Aspnes; *Opt. Commun.*, 1973, 3, No. 3 (Mar), 222~227.  
 [3] D. E. Aspnes, *J. O. S. A.*, 1974, 64, No. 5 (May), 639~646.

## Principle of a photometric ellipsometer compatible with null ellipsometer

WU QIHONG

(Zhejiang University Department of Optical Engineering, Hangzhou)

(Received 29 July 1986)

### Abstract

A new-type photometric ellipsometer was built. Based on PQSA null ellipsometer, the compatible photometric ellipsometer replaces the fixed compensator by a rotating quarterwave plate. The principle is discussed in detail. It is a complete ellipsometer, which can determine the sign of  $\Delta$  unambiguously, and it has the same sensitivity for the  $\Delta$  even with linear polarized light. Experimental results are also reported.

**Key Words:** Ellipsometry.