

10.6 μm 薄膜90°位相延迟片椭圆参数测量方法的研究

戈 兵

摘要: 本文在旋转检偏器式椭圆仪原理的基础上, 通过分析影响椭圆参数 ψ 、 Δ 测量精度的主要因素, 提出改进的测量方法, 从理论上给出提高 ψ 、 Δ 测量精度的途径, 并得出了一些有价值的结论。

一、引 言

八十年代初, 美国、日本等国相继制备出用于CO₂激光加工机的10.6 μm 薄膜90°位相延迟片, 但在文献中都没有介绍其椭圆参数 ψ 、 Δ 的具体测量方法。国内外许多人虽然对 ψ 、 Δ 的测量方法进行了比较深入的研究^{[1][2]}, 但又都局限于近紫外、可见和近红外区, 而对中红外区10.6 μm 波长下椭圆参数的测量始终没有见到报道。

椭圆术作为椭圆偏振光椭圆参数的主要测量手段, 主要有消光式和光度式两种。消光法具有较高的测量精度, 但由于在光路中需要使用晶体示波片作为位相补偿器, 而在10.6 μm 的红外波段又没有合适的光学材料, 限制了它在长波区的应用。光度法不需要使用位相补偿器, 原则上说它的适用范围不受波长限制, 但传统的光度式椭圆仪测量精度不高, 需要对其测量方法加以改进。

本文在旋转检偏器式椭圆仪的基础上, 通过分析影响测量准确度的主要因素, 提出改进的测量方法, 从理论上指出减小测量误差的途径, 从而使测量精度得到提高。

二、基本理论

1. 椭圆偏振光的形成及椭圆参数

一束入射的平面偏振光, 经介质或金属表面反射后, 由于反射光的P分量(平行于入射面)和S分量(垂直于入射面)复振幅反射系数的位相 δ_p 、 δ_s 不同, 因此反射光形成椭圆偏振光。其光矢量振动方程满足:

$$\frac{E_{p,r}^2}{a_1^2} + \frac{E_{s,r}^2}{a_2^2} - 2 \frac{E_{p,r} \cdot E_{s,r}}{a_1 a_2} \cos \Delta = \sin^2 \Delta \quad (1)$$

式中 $E_{p,r}$ 、 $E_{s,r}$ 是P分量、S分量反射光; a_1 、 a_2 是P分量、S分量反射光的振幅, $\Delta = \delta_p - \delta_s$ 是P分量、S分量反射光的位相差。

椭圆偏振光的偏振态, 主要由以下参数确定: 椭圆方位角 θ , 椭圆长短轴 a 、 b , 振幅比 $\text{tg}\Psi = a_2/a_1$, 及椭圆偏心率 $e = \text{tg}\beta = b/a$ 。

2. 旋转检偏器式椭偏仪 (RAE) 的工作原理

RAE的光路如图 1 所示。其工作原理为: 将起偏器 P 的通光方向固定在与光线入射面成 45° 方位上, 入射光经样品 S 反射后, 反射光变为椭圆偏振光。绕光轴旋转检偏器 A , 在一个光学周期 (180°) 内, 每隔一个采样间隔 $\Delta\alpha$, 对探测器的输出光强进行一次采样, 求出傅立叶系数, 即可最终求得样品的椭偏参数 Ψ 、 Δ 。

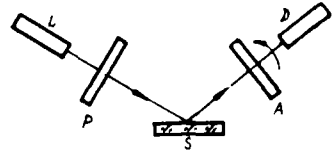


图 1 RAE光路图

若检偏器方位角是 α , 探测器的输出光强 I 遵从以下规律^[3]:

$$I = \frac{1}{2}(a_1^2 + a_2^2) + \frac{1}{2}(a_1^2 - a_2^2) \cdot \cos 2\alpha + a_1 a_2 \sin 2\alpha \cdot \cos \Delta \quad (2)$$

上式可改写为:

$$I = k_0 + k_1 \cos 2\alpha + k_2 \cdot \sin 2\alpha \quad (3)$$

利用离散函数傅立叶变换公式, 可以得到傅立叶系数 k_0 、 k_1 、 k_2 分别为:

$$k_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$$

$$k_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cdot \cos 2\alpha_i$$

$$k_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cdot \sin 2\alpha_i$$

$$\alpha_i = \pi(i-1)/n, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (\text{采样范围 } 180^\circ)$$

式中 n 为检偏器旋转一个周期的采样点数。根据采样定理, 采样次数必须大于信号中最高频率分量的两倍。在RAE中, 最高频率分量为 2 次, 故 n 不能少于 4 点。根据Budde的分析^[3], 增加采样点数将有助于对 k_0 、 k_1 、 k_2 的准确求解, 因此一般取 20 点以上的采样数。

由求得的傅立叶系数, 即可得到椭偏参数 Ψ 、 Δ 及椭偏度 P :

$$\cos \Delta = \frac{k_2}{\sqrt{k_0^2 - k_1^2}} \quad (4)$$

$$\text{tg}\Psi = \frac{\sqrt{k_0 + k_1}}{\sqrt{k_0 - k_1}} \quad (5)$$

$$P = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{k_0} \quad (6)$$

三、改进的测量方法

图 2 给出了在波长 $\lambda = 10.6\mu\text{m}$, 光路中没有其它光学元件的情况下, 线栅偏振器旋转一周, 探测器输出信号的变化。图 2 表明采用上述方法, 旋转检偏器的采样范围取为 180° 或

360°时, 输出信号会产生明显的畸变。产生这种畸变的主要原因是探测器对偏振光的选择性吸收、探测器表面各处对光强的响应率不均匀及线栅偏振器两表面不完全平行所致。

分析图 2 可以看出: 当检偏器在较小的角度范围内采样时, 输出信号的畸变也较小。因此为减小由于在180°或360°范围内采样所带来的输出信号畸变为 Ψ 、 Δ 测量准确度的影响, 可以考虑同时采取以下两种方法:

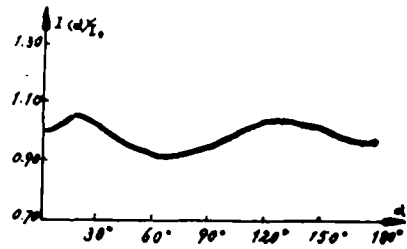


图 2 输出信号畸变为 α 角的关系

1. 使检偏器在较小的角度范围内采样, 同时减小采样间隔, 以保证足够的采样点数。

对式 (3) 采用最小二乘法拟合, 有下式成立:

$$\begin{cases} a_1 k_0 + b_1 k_1 + c_1 k_2 = d_1 \\ a_2 k_0 + b_2 k_1 + c_2 k_2 = d_2 \\ a_3 k_0 + b_3 k_1 + c_3 k_2 = d_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_1 &= n, & a_2 &= \sum_{i=1}^n \cos 2\alpha_i, & a_3 &= \sum_{i=1}^n \sin 2\alpha_i, \\ b_1 &= \sum_{i=1}^n \cos 2\alpha_i, & b_2 &= \sum_{i=1}^n \cos^2 2\alpha_i, & b_3 &= \sum_{i=1}^n \cos 2\alpha_i \sin 2\alpha_i, \\ c_1 &= \sum_{i=1}^n \sin 2\alpha_i, & c_2 &= \sum_{i=1}^n \cos 2\alpha_i \sin 2\alpha_i, & c_3 &= \sum_{i=1}^n \sin^2 2\alpha_i, \\ d_1 &= \sum_{i=1}^n I_i, & d_2 &= \sum_{i=1}^n I_i \cos 2\alpha_i, & d_3 &= \sum_{i=1}^n I_i \sin 2\alpha_i, \end{aligned}$$

$$\alpha_i = \alpha_0 \pm i \cdot \Delta\alpha \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n/2)$$

其中 α_0 是检偏器的起始方位角, $\Delta\alpha$ 是检偏器的采样间隔。傅立叶系数 k_0 、 k_1 、 k_2 可以通过求解上述联立方程得到。

2. 选择适当的检偏器起始方位角 α_0 。

从式 (2) 可以求得光强 I 随位相变化的偏导数:

$$\left| \frac{\partial I}{\partial \Delta} \right| = a_1 a_2 \sin 2\alpha \cdot \sin \Delta$$

如果 $\Delta = 0$, 则 $\left| \frac{\partial I}{\partial \Delta} \right| = 0$ 。表明在位相差 $\Delta = 0$ 附近, 随着 Δ 的变化, 光强只作极小的, 不明显的变化。这时当我们依据测得的光强来计算 Ψ 、 Δ 时, 将会带来较大的误差。

如果 $\Delta = 90^\circ$, 则 $\left| \frac{\partial I}{\partial \Delta} \right|$ 最大, 此时 $\left| \frac{\partial I}{\partial \Delta} \right| = a_1 a_2 \sin 2\alpha$ 。表明 Δ 在 90° 附近变化时, 光强的变化最明显。这时依据所测得的光强曲线来计算 Ψ 、 Δ 时, 将有较高的准确度。在我们对 90° 薄膜位相延迟片的测量中, Δ 接近 90° , 正好符合这种情况。

由 $\left| \frac{\partial I}{\partial \Delta} \right| = a_1 a_2 \sin 2\alpha$ 可以看出, 若检偏器的起始方位角选择在 $2\alpha_0 = 90^\circ$, 即 $\alpha_0 = 45^\circ$, 对 Δ 的准确测量最为有利。

这样,为提高 Ψ 、 Δ 的测量准确度,我们可以选择检偏器的最佳起始方位角 $\alpha_0 = 45^\circ$, 采样间隔 $\Delta\alpha = 1^\circ$, 采样范围 20° , 对20个点进行采样。

实测及其数据处理分析将另文发表。

四、结 论

在探测器的输出信号畸变是 Ψ 、 Δ 测量的主要误差源时,通过选择适当的检偏器起始方位角及采样范围,将明显提高椭偏参数 Ψ 、 Δ 的测量精度。用这种改进的测量方法可以实现对 $10.6\mu\text{m}$ 薄膜 90° 位相延迟片的椭偏参数的准确测量。

参 考 文 献

- [1] R.M.A.Azzam, et al., Ellipsometry and Polarized Light, (North-Holland, Amsterdam, 1979), Chap.3, Chap.5
- [2] D.E.Aspnes, J.Opt.Soc.Am., 64, 639 (1974)
- [3] W.Budde, Appl.Opt., 1, 201 (1964)

A Study on the Measurement Method for Elliptical Polarization Parameters of 90° Thin Film Phase Retarder at $10.6\mu\text{m}$

Ge Bing

Abstract

On the basic principle of rotating-analyzer ellipsometer, an improved measuring method is presented in this paper by analyzing the main facts which affect the measurement accuracy of elliptic polarization parameters Ψ and Δ . The method to increase the measurement accuracy of Ψ and Δ are given in theory, and some valuable conclusions are given.