

晶体相位延迟测量的 $\lambda/4$ 波片法及理论研究

云茂金 李国华

(曲阜师范大学激光所, 曲阜, 273165)

摘要: 通过两束平面偏振光的合成推导出椭圆测量的理论基础, 并由此得出用 $\lambda/4$ 波片测晶体的相位延迟时器件的设置及方法。

关键词: 偏振光 波片 相位延迟

Phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave-plate

Yun Maojin, Li Guohua

(Laser Institute, Qufu Normal University, Qufu, 273165)

Abstract: The theory of ellipsometry is obtained through the composition of two polarized beams. Then the method for phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave plate is obtained.

Key words: polarized beam wave-plate phase retardation

引 言

在光学隔离、偏光干涉技术中, 常需要精确测量晶体的相位延迟^[1]。目前, 测量晶体相位延迟的方法有电光调制法^[2]、光学外差法及光谱测量法等。下面讨论用 $\lambda/4$ 波片测晶体的相位延迟, 并给出测量原理及详细的理论分析。

1 原 理

两束频率相同、位相差恒定、振动方向相互垂直的平面偏振光可合成为椭圆偏振光, 其偏振的态势决定于两平面偏振光的振幅和位相差。任一椭圆偏振光沿长短轴方向的位相差为 $\pi/2$, 若使之通过一快慢轴与椭圆长短轴重合的 $\lambda/4$ 波片, 则此椭圆偏振光被补偿为一束线偏

- 13 Defense Systems Daily, 1999-09-08(1)
- 14 Higgs C. SPIE, 1999; 3706: 216
- 15 Johnson C. Airborne Laser Focus, 2000; 6(5): 2
- 16 Whitley G, Hess P. Inside the Air Force, 1997; 19: 1
- 17 Defense Systems Daily, 2000-02-2(1)
- 18 Vizard F. Popular Science, 1999; 4: 57
- 19 Bender B. Jane's Defense Weekly, 2000-03-22(10)
- 20 Angeles L. AW & ST, 2000-05-01(29)
- 21 Atkinson D. Defense Daily, 1999-01-27(1)
- 22 Dupont G. Inside the Pentagon, 1999-12-16(4)
- 23 Jones H. Laser Focus World, 1999; 10: 77

作者简介: 任国光, 男, 1938 年出生。研究员。现从事激光技术发展策略研究工作。

振光,若在 $\lambda/4$ 波片后加一检偏器,转动检偏器会出现消光位置,测出检偏器旋转的角度便可得出椭圆偏光的椭圆率角。间接得出被测试件的相位延迟。两束振幅大小相同、振动方向沿 x, y 轴、位相差为 Φ 的平面偏振光,若有 $E_x = E_y, E_x = E_y$, 则:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_y e^{i\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y e^{i\Phi} \end{bmatrix} = E_x \begin{bmatrix} 1 \\ e^{i\Phi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

可见这样的两束光合成一椭圆偏光。

下面分析这束椭圆偏光的特点。用计算方法可以得出这束椭圆偏光的特点。椭圆偏光的两种表示方法 (α, β) 和 (θ, β) (其中 $\tan \alpha = E_y/E_x, \tan \beta = \pm b/a, \theta$ 为椭圆方位角), 对于 $\tan \alpha = E_y/E_x = 1, \alpha = \pi/4$ 的椭圆偏光,可表示为 $(\Phi, \pi/4)$ 。再根据两种表示方法之间的换算关系^[3]:

$$\tan 2\beta = \tan \Phi \sin 2\theta \quad (2)$$

$$\tan 2\theta = \tan 2\alpha \cos \Phi \quad (3)$$

把 $\alpha = \pi/4$ 代入 (2) 式和 (3) 式得: $\tan 2\theta \rightarrow \infty$, 故 $2\theta = \pi/2$, 当 $\Phi > 0$ 时, $\theta = \pi/4$; 当 $\Phi < 0$ 时, $\theta = -\pi/4, \tan \beta = \tan 2\theta$, 即 $\beta = \pi/4$ 。可见,两束振幅大小相同、振动方向相互垂直且分别沿 x, y 轴、位相差为 Φ 的线偏振光可合成长轴恒与 Ox 轴成 $\theta = \pm \pi/4$ 的椭圆偏光(见图 1), 如果 Φ 变化,随之改变的只是椭圆的形状(长短轴的比例改变),而椭圆的方位角 θ 不变。若令椭圆的两轴分别为 Ox', Oy' 则 $Ox'y'$ 相对于 Oxy 转过 $\pm \pi/4$, 并且沿 x, y 方向振动的位相差角之半就是椭圆外切矩形的对角线。

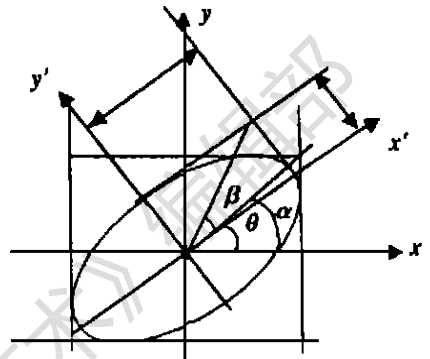


Fig. 1 Parameter of elliptical polarized light

2 测量晶体的延迟相位

根据以上原理,我们分别用 P, S, C, A 布局来测量晶体的延迟相位, P, S, C, A 分别代表起偏器、被测晶体、消色差 $\lambda/4$ 波片^[4]、检偏器。其放置满足的条件是:若起偏器 P 的偏振方向恰好为被测晶体 S 的快慢轴方向的角平分线,则从起偏器出射的光通过被测晶体且被分解的 o, e 光分别与快、慢轴方向一致,且振幅相等,经过被测晶体 o, e 光之间的位相差为 Φ 。由(1)式所推出的结论,这样的两束光合成的椭圆偏光的长轴恰好与被测晶体的快慢轴的角平分线平行,为使 $\lambda/4$ 波片补偿相位使之变为线偏光,需使 $\lambda/4$ 波片的快、慢轴方向的角平分线与被测晶体的光轴方向平行。为此,按以下步骤进行:

(1) 使起偏器与检偏器正交,其间放置 $\lambda/4$ 波片,若 $\lambda/4$ 波片的快(慢)轴与起偏方向平行,则有:

$$\frac{1+i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

所以,确定波片放置时,可将其置于正交偏振器之间,然后转动波片,当系统处于消光状态时, $\lambda/4$ 波片的快(慢)轴与起偏方向平行。

(2) 在起偏器与 $\lambda/4$ 波片之间放置被测晶体,若使起偏器的起偏方向与晶体的快慢方向角平分线平行($\theta = \pi/4$),则有:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + i\cos 2\theta & i\sin 2\theta \\ i\sin 2\theta & 1 - i\cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -i^2 \sin 2\theta E_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

即此时视场最亮。所以,只要在起偏器与λ/4波片之间转动被测晶体,视场最亮时固定晶体,此时晶体的快慢方向的角平分线与起偏方向平行。到此,4个元件的放置已完全确定,我们建立如下坐标系 Ox, Oy 分别为被测晶体的快慢轴方向, Ox', Oy' 为波片的快慢轴。设 Ox' 为快轴(见图2),这样从P出射的光通过晶体时, x, y 轴上的振幅相等,通过S后合成的椭偏光长轴即为P的方向,经C后变为线偏光。则在 $Ox'y'$ 中此线偏光为:

$$\begin{bmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{bmatrix} = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & \sin \frac{\pi}{4} \\ -\sin \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\frac{\Phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\Phi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \cos \frac{\pi}{4} \\ E_0 \sin \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} = \frac{1-i}{\sqrt{2}} E_0 \begin{bmatrix} \cos \frac{\Phi}{2} \\ \sin \frac{\Phi}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

当 $\Phi > 0$ 时,在 $Ox'y'$ 的一、三象限;当 $\Phi < 0$ 时,在 $Ox'y'$ 的二、四象限。

(3) 转动检偏器使之补偿椭圆率达到消光,设转过的角度为 γ , 可得

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) & \sin \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) \\ \sin \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) & \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\Phi}{2} \\ \sin \frac{\Phi}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

得 $\gamma = \Phi/2$ 。此时记下检偏器转过的角度 γ , 可知此晶体的相位延迟为 $\Phi = 2\gamma$ 。

3 讨 论

由(6)式知, $E_0 \begin{bmatrix} \cos \frac{\Phi}{2} \\ \sin \frac{\Phi}{2} \end{bmatrix}$ 在 $Ox'y'$ 中的线偏

光,当 $\Phi > 0$ 时,在 $Ox'y'$ 的一、三象限,当 $\Phi < 0$

时,在 $Ox'y'$ 的二、四象限($-\pi < \Phi < \pi$)。若要求检偏器转动达到的消光角小于或等于 $\pi/2$, 则检偏器逆时针转动位相差为正,顺时针为负。因为λ/4波片其厚度是对特定波长而言的,所以,我们应该采用消色差复合的λ/4波片,还要注意到系统对温度的适应能力^[5], 尽量采用相对测量实际定标方法,以减小系统误差。

参 考 文 献

- 1 李国华,宋连科,李 艺 *et al.* 曲阜师范大学学报,1991; 17(1): 69
- 2 宋连科,李国华. 曲阜师范大学学报,1994; 20(3): 53~ 56
- 3 赵达尊,张怀玉. 波动光学. 北京: 宇航出版社,1988: 285~ 290
- 4 苏美开,李国华,宋连科. 激光技术,1996; 20(1): 29~ 31
- 5 宋连科,李国华. 光电子激光,1997; 8(6): 454~ 457

作者简介: 云茂金,男,1975年10月出生。目前在曲阜师范大学激光所攻读硕士学位。

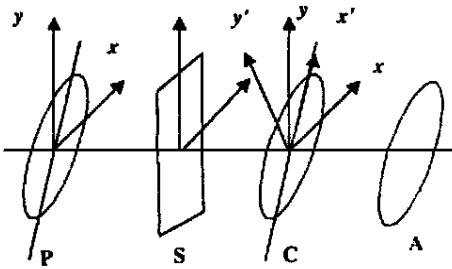


Fig.2 Measurement setup