

调制偏振光相位延迟精密测量实验

引言

在光学技术领域，特别是在偏光技术应用中，光学相位延迟器件是光学调制系统中的重要器件。这类器件是基于晶体的双折射性质，利用光通过晶体可以改变入射光波的振幅和相位差的特点，改变光波的偏振态。相位延迟器件包括各种波片和补偿器，和其它偏光器件相配合，可以实现各种偏振态之间的相互转换、偏振面的旋转以及各类偏振光的调制，广泛应用于光纤通讯、光弹力学、光学精密测量等领域中。相位延迟量是光学相位延迟器件的重要参数，与器件的厚度、光学均匀性、应力双折射等诸多因素有关，其精度直接关系到应用系统的质量，因此准确的测定相位延迟量，提高其测量精度是非常有意义的，得到了越来越多的重视和研究。

目前，对光学相位延迟量的测量方法有很多，包括半阴法、补偿法、电光调制法、机械旋光调制法、磁光调制法、相位探测法、光学外差测量法、分频激光探测法、分束差动法等等。测量方法的发展历程，经历了由简单到复杂，由直接测量到补偿法测量，由标准波片补偿到电光、磁光补偿。补偿法的一个问题是补偿器本身会带来一定的误差，如：标准波片“不标准”，电光补偿存在非线性性、补偿器光轴与测量光束不垂直等。本实验采用 Soleil-Barbinet 补偿器，通过相位补偿的方法测量光学相位延迟器件的相位延迟，采用两种方法判断零点位置，一种是只采用 Soleil-Barbinet 补偿器，用肉眼直接观察光强零点，该方法原理简单、操作方便；另一种是将结合补偿法与电光调制法结合，用调制偏振光准确判断极值点位置，测量精度高，适用范围广。

一. 实验目的

- (1) 了解偏振光学理论
- (2) 了解电光晶体的线性电光效应及调制理论
- (3) 掌握 Soleil-Barbinet 相位补偿器的应用
- (4) 掌握相位延迟测量方法
- (5) 调试实验测量系统，并采用两种方法测量某种待测波片的相位延迟

二. 实验原理

1. 偏振光学理论

一般情况下，普通光源或激光器输出的光不具有特定的偏振态，要想使这种光成为线偏振光，需要在光路中放入偏振器件（称为起偏器，是由双折射材料制成的偏振器，或由二向色性材料制成的偏振片）。而检验一束光是否为线偏振光，则只需在光路中再放入另一偏振器件（称为检偏器），转动检偏器（或起偏器），如果通过检偏器后的光强有强弱变化，且最小光强为零，则说明透过起偏器的光为线偏振光。而相位延迟片则是由双折射材料制成的另外一种光学器件，它可以将线偏振光分解成两个振动方向相互垂直的线偏振光，一个叫 o 光，一个叫 e 光，当晶体的光轴与入射面垂直时，o、e 光的传播方向相同，但由于两束光在晶体中具有不同的折射率和传播速度，当它们从晶体中透射出来时，便具有了一定的相位差，因此该晶体被称为“相位延迟片”。透过相位延迟片的 o、e 光合成为椭圆偏振光，该椭圆偏振光的形状与 o、e 光的相位差有关。特殊情况下，若 o、e 光的相位差（延迟）为 $\pi/2$ ，则合成光为正椭圆线偏振光，若 o、e 光的相位差（延迟）为 π ，则合成光仍为线偏振光，但振动方向转过一角度。对于给定的相位延迟片，o、e 光的相位

差与晶体片的厚度有关，对于给定厚度，其相位差固定。在椭圆偏振光后的光路中再放入检偏器，转动检偏器，其后的光强不变。

思考：双折射晶体的光轴是怎样定义的？o 光、e 光的振动方向如何？其振幅和强度与哪些量有关？怎样能使 o 光、e 光的传播方向相同、振动方向相互垂直？此时，若 o 光、e 光的相位差 $=\pi/2$ ，合成光是什么样的偏振光？当 o 光、e 光的相位差 $=\pi$ 时，合成光是什么样的偏振光？当 o 光、e 光的相位差 $=0$ 或 2π 时，合成光是什么样的偏振光？

2. 补偿原理

Soleil-Barbinet 补偿器是一个 o、e 光相位延迟量可调的“相位延迟片”。由成对的晶体楔 A 和 A' 和一块平行晶片 B 组成。A 和 A' 两光轴都与入射光垂直，且平行于折射棱边，它们可以彼此相对移动，形成一个厚度可变的晶片；晶片 B 的光轴与晶体楔 A 垂直，如图 1 所示。

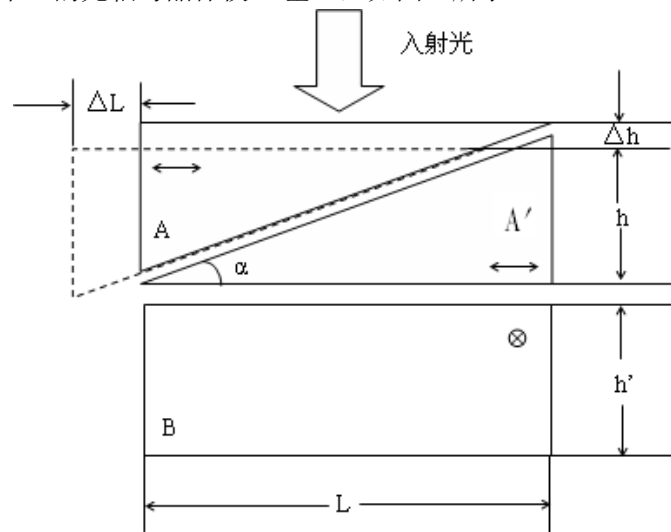


图 1 Soleil-Barbinet 补偿器的原理

设晶体楔厚度为 h ，宽为 L ，楔角为 α ，则

$$h = L \tan \alpha \quad (1)$$

晶体楔平移 ΔL 后，沿光束通过方向厚度改变量为

$$\Delta h = \tan \alpha \Delta L \quad (2)$$

光通过补偿器后产生的相位延迟量为

$$\begin{aligned} \delta_c &= \frac{2\pi}{\lambda} [(n_o - n_e)h + (n_e - n_o)h'] = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)(h' - h) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)\Delta h \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha \Delta L \end{aligned} \quad (3)$$

其中， n_o, n_e 分别是晶体发生双折射的 o 光和 e 光对应的主折射率。（3）式表明光通过补偿器后产生的相位延迟量正比于厚度改变量 Δh ，也正比于晶体楔的平移量 ΔL 。改变 ΔL 即可改变其对出射的 o 光和 e 光的相位差 δ_c 。当 $\delta_c = 0$ 或 2π 时，o 光和 e 光的相位相同，若入射光为线偏振光，则合成光后仍为沿原来方向振动的线偏振光，当 $\delta_c \neq 0$ 或 2π 时合成光为椭圆偏振光。

3. 调制原理

由电场所引起的晶体折射率的变化，称为电光效应。通过晶体的透射光是一对振动方向相互垂直的线偏振光，通过调节外加电场大小，可对偏振光的振幅或相位进行调制。

例如，KD*P 晶体沿光轴方向（z 方向）加外电场 E_z 后，从单轴晶体变成了双轴晶体，折射率椭球与 xy 平面的交线由圆变成了椭圆（图 2）。沿 z 轴传播一对正交的本征模，分别在 ξ 、 η 方向偏振，折射率由（4）式表示。

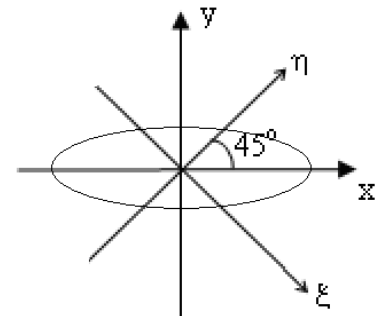


图 2

$$\left. \begin{aligned} n_{\xi} &= n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z, \\ n_{\eta} &= n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z, \\ n_{\zeta} &= n_e \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当光波在 z 方向传播的距离为 L 时，两个本征模的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\eta} - n_{\xi}) L = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} E_z L = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} V \quad (5)$$

通常把 $\delta = \pi$ 时的外加电压称为半波电压，记为 V_{π} ，则由（5）式可得，

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n_o^3 \gamma_{63}} \quad (6)$$

通过 V_{π} 可将 δ 表示为

$$\delta = \pi \frac{V}{V_{\pi}} \quad (7)$$

可见，沿 ξ 、 η 方向振动的出射偏振光其相位差和外加电压 V 的大小成正比，可通过调节外加电场大小的方式实现偏振光的调制。

本实验中所用 KD*P 电光晶体的半波电压 $V_{\pi} = 6000V$ ，调制电压为一正弦调制交变电压，即

$$V = V_0 \sin \omega t \quad (8)$$

其中 $V_0 = 1000V$ 。如果此时起偏器 P 沿 x 方向透振，检偏器 A 沿 y 方向透振，电光调制晶体的感生主轴 ξ 、 η 方向和 x 轴成 45° 角，则输出光波的光强为：

$$I' = I_{\xi y} + I_{\eta y} + 2\sqrt{I_{\xi y} I_{\eta y}} \cos \pi \left(\frac{V}{V_{\pi}} + \delta \right),$$

其中， $I_{\xi y} = I_{\eta y} \propto A_{\xi y}^2 (= A_{\eta y}^2)$ ，

与入射光强 $I_0 (\propto A_x^2)$ 的关系为

$$I_{\xi y} = I_{\eta y} = I_0 \cos^2 45 = \frac{1}{4} I_0,$$

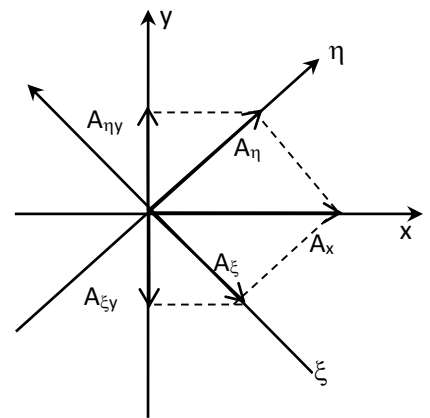


图 3

即

$$I' = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi V_0}{2V_\pi} \sin \omega t\right) = a_0 + a_2 J_2\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cos(2\omega t) - \dots \quad (9)$$

式中 a_0 、 a_2 为常数， J_k 为 k 阶贝塞尔函数。（9）式表明输出的交变信号为二次频率信号，没有基频。这是系统零点的特征。

调制电压、晶体的相位差、输出光强的关系如图 4 所示。

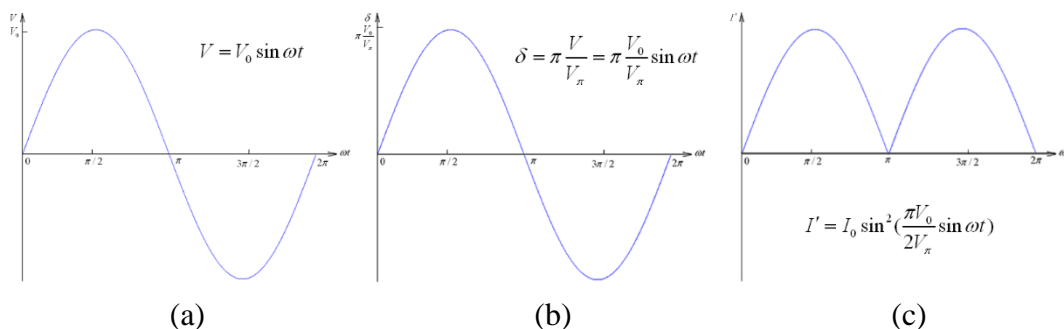


图 4 调制电压、晶体的相位差、输出光强的关系

三. 实验装置

1. 只采用 Soleil-Barbinet 补偿器的实验装置

如图 5 所示：

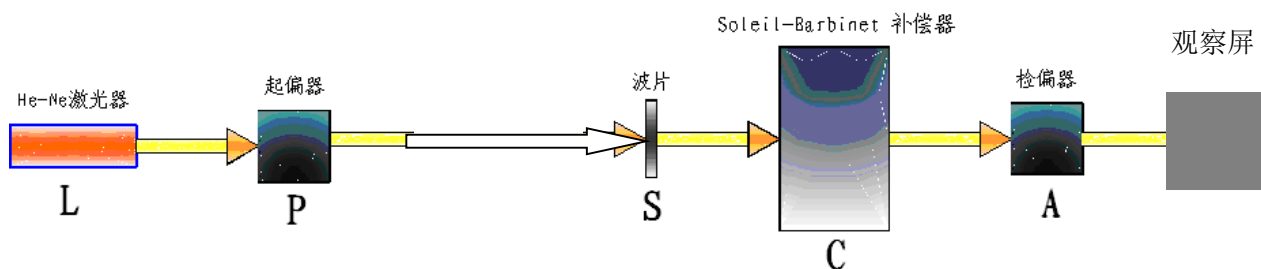


图 5 只采用 Soleil-Barbinet 补偿器的实验装置示意图

L 是光源，P 为起偏器，S 为待测波片，C 为 Soleil-Barbinet 补偿器，A 为检偏器，出射光强在观察屏上观察。系统的坐标方向规定为：光束传播方向为 z 轴，起偏器的透振方向沿 x 轴、检偏器的透振方向沿 y 轴，当 S、C 未加入时，观察屏上光强为零。当加入待测波片 S 或 Soleil-Barbinet 补偿器 C 时，调节它们的快慢轴方位，都会发现大多数情况下观察屏上光强随其快慢轴方位发生变化，此时起偏器 P 产生的线偏振光经过 S 或 C，变成椭圆偏振光，该椭圆偏振光在检偏器 A 的偏振化方向上有分量。但当 S 或 C 的快慢轴平行起偏器 P 或检偏器 A 的偏振化方向时，观察屏上光强为零。本实验中将待测波片 S 和补偿器 C 的快慢轴方位均调至与 x 轴和 y 轴的夹角为 45° ，通过补偿器 C 的光学相位补偿测量待测波片 S 的相位延迟。

2. 采用 Soleil-Barbinet 补偿器与电光调制结合的实验装置

如图 6 所示

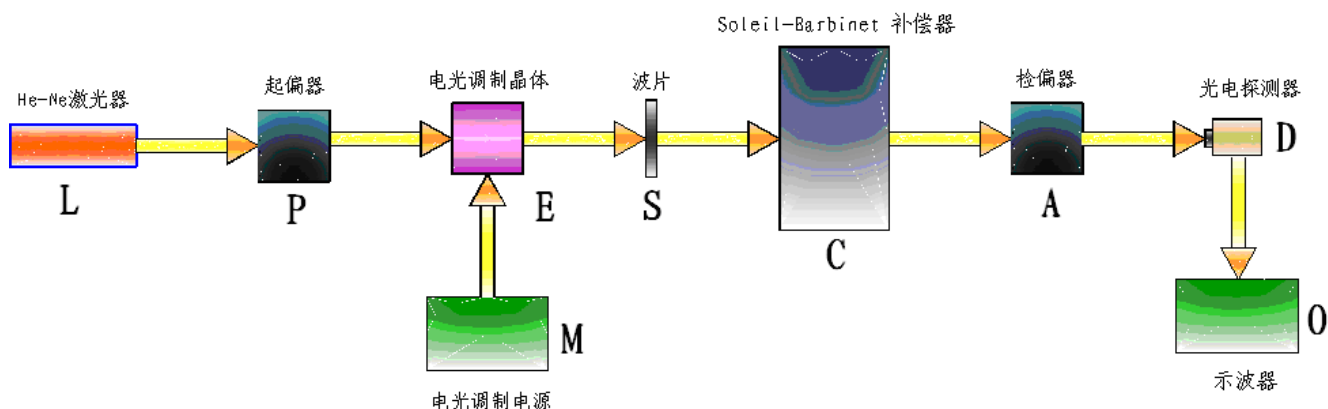


图 6 采用 Soleil-Barbinet 补偿器与电光调制结合的实验装置示意图

L 是光源，P 为起偏器，E 为电光调制晶体，通过调制信号源 M 加上调制信号。S 为待测波片，C 为 Soleil-Barbinet 补偿器，A 为检偏器，出射光由光探测器 D 接收，并经过滤波放大等处理后，最终结果显示在示波器 O 上。系统的坐标方向规定为：光束传播方向为 z 轴，起偏器的透振方向沿 x 轴、检偏器的透振方向沿 y 轴，电光调制器加电压后的感生轴 ξ , η 方向和待测波片及补偿器的快慢轴方向一致，和 x 轴成 45° 角，如图 7 所示。

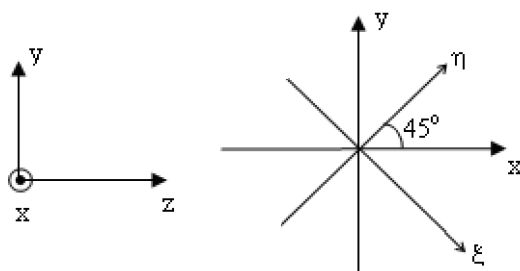


图 7 系统的坐标方向

在本实验中，通过电光调制晶体的电光效应，产生调制偏振光以准确判断极值点的位置；通过 Soleil-Barbinet 补偿器进行光学相位补偿；从而将调制和补偿两种作用分开，精度高，误差小，稳定性好。

四．实验内容及步骤

1. 只采用 Soleil-Barbinet 补偿器测量的实验内容与步骤

1. 参见图 5，在光学防震平台上仔细调试，使各部件等高共轴。
2. 调整激光器 L 方向，使出射光平行于台面。后续放入的探测器和各种光学元件其表面均应和光线传播方向垂直。
3. 放入偏振棱镜 P、检偏棱镜 A，通过观察图 5 中“观察屏”上的光强“最小”，表示两者严格正交（由于偏振棱镜的消光比不理想，观察屏上仍有微弱光强）。
5. 放入补偿器 C，调节其上的螺旋测微器，亦即改变式（3）中的 ΔL ，使 C 处于零延迟位置以外的其他任何位置。
6. 绕轴旋转补偿器 C 使出射光最小，此时补偿器快慢轴沿 x、y 轴，记下此时补偿器的旋转方位角。
7. 将补偿器 C 相对上述位置旋转 45° 度，锁紧旋转螺丝。
8. 补偿器定标。由于 Soleil-Barbinet 补偿器通过厚度调节能够提供 $0-2\pi$ 范围内任意的相位延迟量，调节补偿器 C 的平移旋钮，观察输出光强的变化，定出光强相继两次变为最小（对应的相位延迟量为 0 和

2π) 时补偿器平移位置的 x_1, x_2 , 两最小值之间的平移距离 $\Delta L = x_2 - x_1$ 作为仪器常数, 对补偿器在 $0-2\pi$ 之间的相位延迟进行线性定标。即

$$\delta_c = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha \cdot \Delta L = C \cdot \Delta L$$

可得补偿器的定标系数为:

$$C = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha = \frac{2\pi}{\Delta L}$$

该系数与光源波长、补偿器楔角值以及材料的折射率差有关。每次测量前应先对补偿器定标。

9. 调节补偿器 C 的平移旋钮, 使补偿器 C 恢复到零延迟位置 x_1 。至此, 系统调试完毕, 进入测量状态。

10. 放入待测波片元件 S, 旋转 S, 找到光强为零的位置 (此时快慢轴平行起偏器 P 或检偏器 A 的偏振化方向), 记下此时 S 的旋转方位角。然后将 S 准确旋转 45 度, 此时待测元件 S 的快慢轴方向、补偿器 C 的快慢轴方向重合, 即它们与 x、y 轴的夹角均为 45 度。“观察屏”上的光强不为零。

11. 调节补偿器 C 的平移旋钮, 找到使光强为零的平移位置 x' , 此时补偿器 C 的平移量为 $\Delta L' = x' - x_1$ 。根据定标系数, 可得到补偿器 C 的相位延迟 δ'_c , 待测元件 S 的相位延迟即为 $\delta_s = 2\pi - \delta'_c$ 。

12. 对待测元件 S 光强为零的位置 (即其快慢轴平行起偏器 P 或检偏器 A 的偏振化方向) 分别顺时针、逆时针各旋转 45 度, 并让激光照射 S 的不同位置多次测量求平均值。

1. 采用 Soleil-Barbini 补偿器与电光调制结合时的实验内容与步骤

1. 在上述测量内容完成后, 先将补偿器 C、待测元件 S 移出光路, 再将电光晶体 KD*P 调制器 E 放入 P 与 A 中间的光路中并加上调制电压, 将光电探测器 D 置于 A 后面的光路中替代观察屏, 并将 D 的输出信号接入示波器 O, 参见图 6。

2. 调整 KD*P 晶体的角度, 当其感生主轴方向与 x 轴或 y 轴的夹角为 45 度 (沿 ξ 、 η 方向) 时, 示波器上的信号出现频率加倍现象, 如图 4(c)。

3. 放入补偿器 C, 使 C 处于零延迟位置以外的其他任何位置。

4. 绕轴旋转补偿器 C, 当示波器上信号出现频率加倍现象时, 说明补偿器快慢轴沿 x、y 轴。记下此时补偿器旋转的位置。

5. 补偿器 C 相对上述位置旋转 45 度。此时补偿器快慢轴和入射正交调制偏振光的偏振方向重合 (沿 ξ 、 η 方向)。锁进旋转螺丝。

6. 补偿器定标。调节补偿器 C 的平移旋钮, 观察输出信号的变化, 由二次谐波出现的位置, 可定出 0 和 2π 相位延迟量对应补偿器的平移位置 x_1, x_2 , 两个最小值之间的平移距离 $\Delta L = x_2 - x_1$ 作为仪器常数, 随光源波长的不同而不同。可在 $0-2\pi$ 之间对补偿器线性定标。根据

$$\delta_c = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha \cdot \Delta L = C \cdot \Delta L$$

可得补偿器的定标系数为:

$$C = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \tan \alpha = \frac{2\pi}{\Delta L}$$

该系数和光源波长、补偿器楔角值及材料的折射率差有关。每次测量前应先对补偿器定标。

7. 调节补偿器 C 的平移旋钮, 使补偿器 C 恢复到零延迟位置 x_1 。至此, 系统调试完毕, 进入测量状态。

8. 放入待测元件 S。旋转 S，找到零点位置（即信号倍频位置）。然后将 S 准确旋转 45 度。

此时待测元件 S 的快慢轴方向、补偿器 C 的快慢轴方向、KD*P 晶体的感生主轴方向重合。

9. 调节补偿器 C 的平移旋钮，找到零点位置（即信号倍频位置） x' ，此时补偿器 C 的平移量为 $\Delta L = x' - x_1$ 。根据定标系数，可得到补偿器 C 的相位延迟 δ_C ，待测元件 S 的相位延迟即为 $\delta_s = 2\pi - \delta_C$ 。

10. 对待测元件 S 不同方向，不同位置多次测量求平均值。

五. 参考文献

1. 宋菲君，信息光子学物理[北京大学物理学丛书]，北京大学出版社，2006
2. 陈文正，二维旋光准直仪的信号处理及自动补偿[硕士论文]，清华大学，No.10130138840,1988
3. 范玲，宋菲君，调制偏振光在光学相位延迟测量中的应用，2007
4. 吴思诚，近代物理实验，北京大学出版社，1995
5. 姚启钧，光学教程[高等学校教材]，高等教育出版社，1989
6. 郁道银，工程光学，机械工业出版社，2006