

# 高质量PVA塑料消色差波片\*

王敬山, 艾国祥, 宋国峰

中国科学院北京天文台, 100080

## 摘要

本文概述了三片型消色差波片(二分之一波片和四分之一波片)的原理, 并讨论了用PVA塑料膜组成的高质量组合消色差波片的性能及测试结果。

## 一、引言

消色差波片是万能双折射滤光器中非常重要的光学元件之一。一般来讲, 消色差波片的设计制作有以下两种方法:

(i) 用不同种双折射材料组成消色差波片。这是根据双折射率随波长 $\lambda$ 变化的原理设计的。设由几种双折射率材料的晶片, 每种材料的双折射率为 $\mu_i(\lambda, t)$ , 厚度为 $d_i, i=1, 2, \dots, n$ , 则可由几个方程决定每种材料的厚度,

$$\sum_{i=1}^n \frac{\mu_i(\lambda, t)d_i}{\lambda} = \delta(\lambda), i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中 $t$ 为温度,  $\delta$ 为延迟量。用两种材料(quartz and  $MgF_2$ )制作的消色差波片, 我们已经讨论过(邓元勇等, 1993), 并用在了多通道双折射滤光器中。

(ii) 用多片同种双折射材料组成的消色差波片。这种方法是通过选择每单片的延迟大小、光轴方向来组成消色差波片的(Pancharatnam, 1995; Title, 1975)。材料可选用双折射晶体(如水晶、云母等), 也可用PVA塑料延迟膜。

本文主要讨论用PVA塑料膜制作的组合消色差波片的原理及性能。和双折射晶体材料制成的消色差波片相比较, PVA消色差波片有以下几个优点:

- (a) 视场角很大;
- (b) 随温度的变化不大;
- (c) 可以做得很薄, 有利于在空间科学和技术中使用;
- (d) 造价低, 而双折射晶体消色差波片成本高, 而且难于加工。

## 二、三片型1/2和1/4消色差波片的设计原理

对于同种材料组成的组合延迟片, 成为真正的双折射延迟片的条件是:

- (i) 具有稳定的光轴。在Poincare球上, 组合片光轴是从球心到赤道上某点的连线
- (ii) 具有稳定的延迟。在Poincare球上, 任何形式的偏振光通过它后, 都表现为一个绕球心与赤道上某一点的连线(代表光轴)的一个纯正的转动。

对于三片型组合延迟片, 只要第一片和第三片的光轴平行, 延迟相等, 那么该组

\* 国家自然科学基金资助项目



合延迟片就是一个真正的双折射延迟片(Pancharatnam, 1955)。由Poincare球上的转动并利用球面三角公式可求得如下两式:

$$\cos \delta = \cos 2\delta_1 \cos \delta_2 - \sin 2\delta_1 \sin \delta_2 \cos 2c_2 \quad (2)$$

$$\cos 2c_2 = \operatorname{cosec} 2c_2 (\sin 2\delta_1 \operatorname{ctg} \delta_2 + \cos 2\delta_1 \cos 2c_2) \quad (3)$$

其中 $2\delta_1$ 为第一片和第三片的延迟,光轴方位角为零; $2\delta_2, c_2$ 分别为中间片的延迟和光轴方位角; $2\delta$ 和 $c$ 分别为组合延迟片的延迟和光轴方位角。

为了找到在有限波长范围内组合延迟片是消色差的条件,设对于波长为 $\lambda_0$ 的光,每单片的延迟是 $\delta_1, \delta_2, \delta_1$ ,波长为 $\lambda', \lambda''$ 的光对应的延迟为 $\delta_1' = (1-f)\delta_1$ 和 $\delta_1'' = (1+f)\delta_1, i=1, 2$ 。并令组合片的延迟为 $\delta = \delta' = \delta''$ ,那么有

$$\cos \delta = \cos 2\delta_1' \cos \delta_2' - \sin 2\delta_1' \sin \delta_2' \cos 2c_2 \quad (4)$$

$$\cos \delta = \cos 2\delta_1'' \cos \delta_2'' - \sin 2\delta_1'' \sin \delta_2'' \cos 2c_2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \sin 2\delta_1' \operatorname{ctg} \delta_2' - \sin 2\delta_1'' \operatorname{ctg} \delta_2'' \\ & = (\cos 2\delta_1'' - \cos 2\delta_1') \cos 2c_2 \end{aligned} \quad (6)$$

我们令中间片的延迟 $2\delta_2$ 在设计中心波长处为 $\pi$ (即为1/2波片),把 $\delta_2' = (1-f) \cdot \pi/2$ 和 $\delta_2'' = (1+f) \pi/2$ 代入(4)和(5),并消去 $\delta$ ,则有

$$\begin{aligned} \cos 2c_2 &= \frac{\cos 2\delta_1' \cos \delta_2' - \cos 2\delta_1'' \cos \delta_2''}{\sin 2\delta_1' \sin \delta_2' - \sin 2\delta_1'' \sin \delta_2''} \\ &= \frac{\cos 2\delta_1' + \cos 2\delta_1''}{\sin 2\delta_1' - \sin 2\delta_1''} \cdot \operatorname{tg}(f \cdot \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (7)$$

把(7)代入(6)

$$\sin 2\delta_1' + \sin 2\delta_1'' \operatorname{tg}(f \cdot \frac{\pi}{2}) = \frac{\cos^2 2\delta_1'' - \cos^2 2\delta_1'}{\sin 2\delta_1' - \sin 2\delta_1''} \cdot \operatorname{tg}(f \cdot \frac{\pi}{2})$$

此式是成立的。

对于组合1/2消色差波片, $2\delta = \pi$ ,那么 $\cos \delta = \cos \pi/2 = 0$ 。代入(4)和(5),并消去 $c_2$ ,则有

$$\sin 2(\delta_1' + \delta_1'') = 0 \quad (8)$$

把 $\delta_1' = (1-f)\delta_1$ 和 $\delta_1'' = (1+f)\delta_1$ 代入(8),则有

$$\sin 4\delta_1 = 0 \quad (9)$$

满足(9)成立的解有两个

$$4\delta_1 = \pi \text{ 或 } 2\pi,$$

$4\delta_1 = \pi$ 并不能使(4)、(5)、(6)同时成立,因此只有 $4\delta_1 = 2\pi$ 才是有意义的,即

$$2\delta_1 = \pi, \quad (10)$$

$c_2$ 可由

$$\cos 2c_2 = - \frac{\operatorname{tg}(f \cdot \pi/2)}{\operatorname{tg}(f \cdot \pi)} \quad (11)$$

求得。

组合1/2消色差波片的光轴方位角 $c$ 可由下式得到

$$\operatorname{ctg}2c = -\frac{\operatorname{tg}(f \cdot \pi/2)}{\sin(f \pi) \cdot \sin 2c_2} \quad (12)$$

对于组合1/4消色差波片,  $2\delta = \pi/2$ , 把  $2\delta_2 = \pi$ , 及

$$\delta_1' = (1-f)\delta_1 \text{ 和 } \delta_1'' = (1+f)\delta_1$$

代入(4)(5), 并消去 $c_2$ , 可得到

$$\sin(f \cdot 2\delta_1) = \frac{\sin(f \cdot \pi/2)}{\cos \delta} \cdot \sin 2\delta_1 \quad (13)$$

由(7), 得到

$$\operatorname{ctg}2c_2 = -\frac{\operatorname{tg}(f \cdot \pi/2)}{\operatorname{tg}(f \cdot 2\delta_1)} \quad (14)$$

组合1/4消色差波片的光轴方位角 $c$ 可由下式得到

$$\cos 2c = -\frac{\cos(2\delta_1) \cdot \tan(f \cdot \pi/2)}{\cos(f \cdot 2\delta_1) \cdot \sin 2c_2} \quad (15)$$

根据数值计算, 当取 $f=0.1414$ , 组合1/2消色差波片的参量各为:

$$2\delta_1 = \pi$$

$$2\delta_2 = \pi$$

$$c_1 = 0^\circ$$

$$c_2 = 59^\circ 10'$$

$$c = 30^\circ 50'$$

组合1/4消色差波片的参量为:

$$2\delta_1 = 115^\circ 30'$$

$$2\delta_2 = \pi$$

$$c_1 = 0^\circ$$

$$c_2 = 70^\circ 13'$$

$$c = 30^\circ 45'$$

### 三、组合消色差波片的制作及延迟、光轴的测试

设计的中心波长为 $\lambda_0 = 5600\text{Å}$ , 若取 $f=0.1414$ , 那么组合消色差波片的适用范围为 $4000\text{Å} \sim 7000\text{Å}$ 。为了使组合光轴 $c$ 为零度,  $c_1$ 和 $c_2$ 都要转动一个角度 $c$ 。

对于1/2组合消色差波片



$$2\delta_1(\lambda_0) = 180^\circ$$

$$2\delta_2(\lambda_0) = 180^\circ$$

$$c_1 = -30^\circ 50'$$

$$c_2 = 28^\circ 20'$$

对于1/4组合消色差波片

$$2\delta_1(\lambda_0) = 115^\circ 50'$$

$$2\delta_2(\lambda_0) = 180^\circ$$

$$c_1 = -30^\circ 45'$$

$$c_2 = 39^\circ 28'$$

每单片延迟片都裁好后,用两片K9玻璃胶合起来,就作成了组合消色差波片。经高精度晶体厚度及光轴检测仪测试,位相延迟的最大相对误差小于3%,组合光轴误差小于 $\pm 20'$ ,如表1a和1b所示。

表1a. 1/2 PVA塑料消色差波片的部分测试结果

| 样品 | 位 相 延 迟 |        |        |        | 位相延迟的<br>最大相对误差 |
|----|---------|--------|--------|--------|-----------------|
|    | 4861A   | 5461A  | 5893A  | 6563A  |                 |
| 1# | 0.5081  | 0.5016 | 0.5031 | 0.5016 | 1.62%           |
| 2# | 0.5090  | 0.4984 | 0.5024 | 0.5056 | 1.80%           |
| 3# | 0.5059  | 0.5031 | 0.5052 | 0.5021 | 1.18%           |
| 4# | 0.5040  | 0.4938 | 0.4991 | 0.4977 | -1.24%          |
| 5# | 0.5003  | 0.4941 | 0.4955 | 0.5010 | -1.18%          |
| 6# | 0.4997  | 0.4923 | 0.4930 | 0.4961 | -1.54%          |

表1b. 1/4 PVA塑料消色差波片的部分测试结果

| 样品 | 位 相 延 迟 |        |        |        | 位相延迟的<br>最大相对误差 |
|----|---------|--------|--------|--------|-----------------|
|    | 4861A   | 5461A  | 5893A  | 6563A  |                 |
| 1# | 0.2449  | 0.2507 | 0.2520 | 0.2469 | -2.24%          |
| 2# | 0.2465  | 0.2502 | 0.2491 | 0.2436 | -2.56%          |
| 3# | 0.2452  | 0.2499 | 0.2498 | 0.2442 | -2.32%          |
| 4# | 0.2522  | 0.2554 | 0.2573 | 0.2486 | 2.92%           |
| 5# | 0.2481  | 0.2540 | 0.2552 | 0.2502 | 2.08%           |
| 6# | 0.2511  | 0.2518 | 0.2535 | 0.2438 | -2.60%          |



#### 四、组合消色差波片的温度效应及视场

晶体材料制作的消色差波片的温度系数约为 $1.2 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$  (邓元勇等, 1993)。PVA 塑料消色差波片的延迟随温度的变化不大, 其温度系数约为 $1.0 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。这在滤光器, 特别是磁分析器的应用中, 提供了非常便利的条件。

另一方面, 晶体材料的偏轴视场效应很严重, 这由晶体延迟片的视场公式可以看出,

$$\delta = \delta_0 \left[ 1 + \Phi^2 k \left( \frac{\cos^2 \theta}{\gamma} - \frac{\sin^2 \theta}{\alpha} \right) \right] \quad (16)$$

其中  $k = \frac{\alpha \gamma - \beta^2}{2(\gamma - \alpha) \beta^2}$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别是晶体的最小、中间大小、最大的主折射率,  $\Phi$  是入射角,  $\theta$  是相对  $\alpha$  轴的入射面的方位角。这种离轴视场效应可由下面一种简单的方法检验出来: 在两交叉的偏振片之间, 放入一晶体消色差波片, 将一白光光源放在偏振片前方, 那么可以看到彩色的双曲线条纹。放入一PVA 消色差波片, 则看不到这种彩色条纹。这就证明PVA 塑料消色差波片的视场角比较大, 这在物理光学领域的应用中, 是一较大优势。

#### 五、结论

消色差波片是物理光学中的一个重要元件, PVA 塑料消色差波片具有延迟误差小、易加工、成本低的特点, 能够成批量生产。高质量PVA 塑料消色差波片的研制成功, 不仅解决了双折射滤光器中的一个重要问题, 也在物理光学领域里拓展了消色差波片应用。

#### 参考文献

- 邓元勇, 艾国祥, 王敬山, 1993, 天体物理学报, 13, 283  
Evans, J. W., 1949, J. Opt. Soc. Amer., 39, 229  
Pancharatnam, S., 1955, Proc. Indian Acad. Sci. A, 41, 130, 137  
Shurcliff, W. A., 1962, Polarized Light, Harvard University  
Title, A. M., Rosenberg, W. J., 1981, SPIE, 307, 120

### High Quality PVA Plastic Achromatic Waveplate

Wang, Jingshan, Ai Guoxiang, Song Guofeng

Beijing Astro. Obs., Chinese Acad. of Sci., Beijing 100080, China

Abstract. In this article we described the principle of three-plate half and quarter achromatic waveplate and discussed the qualities and the test results of the high quality achromatic waveplates which are made of PVA plastic retardation film.