

# 双折射滤光器偏振片的试制

胡岳凤 艾国祥

(北京天文台)

## 一、引言

1808年马吕斯发现了反射光的偏振性, 20年后, 德国的尼科耳用冰洲石制成尼科耳棱镜, 得到了线偏振光, 但是贵重的冰洲石的块度限制了它的通光口径, 而且其通光方向厚度太大, 不利于在复杂而小巧的仪器中使用。直到1938年兰特, 开斯门等发明了H型人造偏振片, 即在拉伸了的聚乙烯醇(PVA)薄膜的长链分子上加入碘, 碘原子在薄膜纤维上形成链式聚合, 使其成为有二向色性的长链分子团, 干燥后用赛璐珞或平面玻璃作为保护片胶合后就制成偏振片。H片具有高偏振度, 大面积和薄片型的特点, 给偏振片在各方面的应用开辟了广阔的前景, 特别是对天文物理光学的发展起了重要的作用。偏振现象最早应用于太阳的光谱观测。1945年里奥制成了第一架使用于太阳色球层单色光观测的干涉偏振滤光器, 这架仪器如果没有薄片型的偏振片, 那是不可想象的。1950年对太阳磁敏线塞曼子线进行偏振分析而测得了太阳上的“点”磁场。而对于太阳视面磁场的即时分布, 则在70年代制成了更为复杂的干涉偏振滤光器之后才得到的。因此, 借助于偏振片, 天文学家们获得了大量重要的、更为广泛的信息。偏振片的质量直接影响到观测的结果, 而观测本身则日益对偏振片提出了更高的要求。

为了改进和研制太阳观测仪器(色球望远镜, 日食观测仪器, 磁场望远镜和精细结构望远镜等), 我们研制了可见光区高偏振

度(P), 高透射率(T)的偏振片, 就各种胶合剂对开胶、应力、耐温等问题进行了大量的实验。已达到蓝区 $P \geq 99.95\%$ , 绿-红区 $P \geq 99.99\%$ ; T为38~40%的高指标, 并能在45℃硅油浸泡中长期使用。

## 二、要求

偏振片的主要性能指标为稳定性, 透射率, 偏振度, 方位误差和分辨率等。

1. 稳定性 为减少元件表面反射和匹配不同晶体双折射温度系数的差异, 滤光器必须在恒温硅油中工作。恒温温度则参考工作地点最高气温而定。例如北京则以40~45℃为宜。因此必需选择适当的成膜工艺及胶合剂, 使偏振片能在45℃以上硅油中长期工作, 而不致开胶或退偏。北京天文台1957年进口的苏制AΦP-2色球望远镜就因NT-46滤光器中的偏振片变质而大大降低观测质量, 至1963年最后两片偏振片的偏振度P已下降至97%以下, 所产生的散射光已达到极大光量的二倍左右, 其他各片亦有膜收缩和P下降现象。

2. 透射率 偏振片对自然光的透射率如图1所示。

$$T_{\text{自}} = \frac{I_1 + I_2}{2I_0} \quad (1)$$

$2I_0$ 为自然光的强度,  $I_1$ 为平行偏振轴向振动的透射光强度,  $I_2$ 为垂直偏振轴向振动的透射光强度。仪器的总透射率主要决定于偏振片的透射率T, 它影响到望远镜的曝

光时间和分辨率。n片偏振片重叠时的总透射率

$$\tau = \frac{1}{2} (T)^n \quad (2)$$

T为单片偏振片对偏振光的透射率。

磁场望远镜滤光器要求偏振片整体在硅油中总透射率 $\geq 0.12$ ，滤光器若采用Lyot简单级，大约需用13片偏振片，现设计采用了二个Sölc级及Evans分升级，则减至八片，要求每片在空气中的透射率 $T \geq 0.76$ 。

3. 偏振度P 偏振片的P为自然光穿过偏振片后，出射光中完全线偏振部分占总出射光强的百分比，如图1所示。

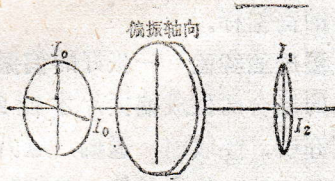


图1 自然光透过偏振片光振动之示意图

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \approx 1 - 2 \frac{I_2}{I_1} \quad (\text{当 } I_1 \gg I_2 \text{ 时}) \quad (3)$$

对P的要求取决于不完全偏振片所引起的散射光的大小。设滤光器透射带相邻两极大之间总透射能量中散射光所占比例为 $f_s$ ，对简单Lyot级滤光器，若各晶片轴向平行排列，则有

$$f_s = 0.11 + 0.61 \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{1/2} + N \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (4)$$

其中N为滤光器级数。

若相邻晶片轴向均正交，则有

$$f_s = 0.11 - 0.61 \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{1/2} + N \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (5)$$

若最后(最厚)一晶片轴向与前面所有的都正交，则有

$$f_s = 0.11 - 0.39 \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{1/2} + N \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (6)$$

采用完全偏振片则散射光为0.11，若采用不完全偏振片，及 $N=10$ 或 $12$ ，则在后两种情况下，可分别求得取某P值时杂散光为极小值 $f_{s \min}$ ，比完全偏振片所产生的杂散光还要小(见表1)。偏振度是随仪器的老化而降低的，试验证明，要求 $P \geq 99.90\%$ ，这样在正常老化情况下不会导致 $P < 99.8\%$ ，而加大杂散光。

表1 几种排列方向的偏振度与散光之关系

	P(%)	$f_{s \min}$	$f_s$	$P_{\min}(\%)$
(4)	100	0.11	0.11	100
(5)	99.81	0.1007	0.11	99.26
	99.87	0.1022		99.48
(6)	99.92	0.1062	0.11	99.70
	99.95	0.1068		99.79

注：(4)、(5)、(6)为公式编号。表中虚线上方为 $n=10$ 的值，下方为 $n=12$ 的值。

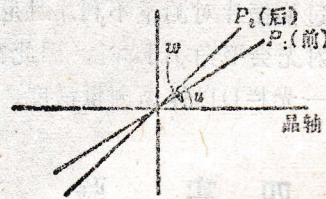


图2

4. 方位误差 两保护玻璃外表间夹角会影响到相邻晶体通光面之间的夹角，从而加大散射光。一般要求此角度为 $0.5'$ 以下。方形偏振片与其边之夹角误差会引入偏振轴与晶轴夹角的误差，若晶轴与两边偏振片轴夹角分别为 $u$ 和 $\omega$ ，见图2。 $a$ 为入射光振幅， $\delta$ 为位相差，则出射光强度为

$$A^2 = a^2 \left[ \cos^2(u - \omega) - \sin 2u \sin 2\omega \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] \quad (7)$$

要求轴取向误差 $<10'$ 。

### 三、测量方法及装置

测量方法的正确与否将直接影响试制的成败。往往由于光源，单色器和接收器对光波的各向异性，而破坏了测量的精度。我们采用了单色仪加尼科耳棱镜（或偏振度极高之偏振片）来得到单色性较好又连续可调的完全偏振光作为光源；采用大阴极面的光电倍增管作为接收器。测量装置如图3。

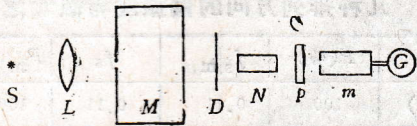


图3 测量装置示意图

S—光源；L—聚光镜；M—单色仪；D—光栏；N—尼科耳棱镜；m—光电倍增管；G—检流计。

待测偏振片P可旋转，当P的偏振轴与N一致或垂直，和将P取走时，可测得 $I_1$ ， $I_2$ 和 $I_0$ ，则可根据公式(1)，(3)算出P的T和P。倾斜光透过偏振片对测量不利，且尼科耳棱镜要求入射光会聚角小于 $28^\circ$ ，因此在出射狭缝后放一光栏D以提高测量精度。

### 四、实 验

针对我们的要求，现有产品指标要进一步改进，有些工艺需要改革，为此进行了一系列实验。

**1. 成膜工艺** 以往的成膜工艺得到的偏振膜P极高，T很低，主要是由于碘液浓度较大，浸碘时间长，拉伸倍数小。在固定拉伸倍数下，P和T的提高是互相矛盾的，而增加拉伸倍数则对P，T的提高都有利，实验得出拉伸倍数与P的关系如图4所示。我们选取拉伸比为4.5倍，减低并固定碘液浓度，调整浸碘时间，在热饱和水汽中拉

伸。

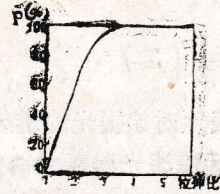


图4 拉伸倍数与偏振度之近似关系

拉伸比即拉伸后与拉伸前的长度比，碘液浓度 $<1/1000$ ，浸碘3~5。

P，T都是波长的函数，太阳色球氢 $H\alpha$ 线正处于T的低谷中，但在放弃蓝绿区高偏振的前提下，还可保证 $H\alpha$ 处的 $P < 99.95\%$ ，而提高此处的T到 $38 \sim 40\%$ 。在 $5000 \sim 7000 \text{ \AA}$ 的范围内曾达到单一波长 $P \approx 99.99\%$ ，T接近 $40\%$ 的高指标。

#### 2. 浸硅油实验

一张好的偏振膜必需选择适当的胶合剂做成偏振片才能经久耐用，否则开胶，膜收缩，退偏，应力等弊病就不可避免。针对使用条件，我们对用各种胶合剂的偏振片做了浸硅油及在硅油中加温到 $45^\circ\text{C}$ 等试验。

冷胶大致可分两大类：

(1) 溶剂挥发型胶：此类胶试验了二甲苯为溶剂的加拿大胶和中性树脂，及二甲苯和乙醇为溶剂的各种牌号冷杉胶等约八种胶。用这些胶将两片光学玻璃对粘和夹上偏振膜做成偏振片，将胶合件置于红外线下加热，室温 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ 的烤片室中一个月后，再浸入硅油，仍放到烤片室中，两个月后即发现边缘局部有硅油渗入。

另外又将固态加拿大树脂，冷杉胶和中性树脂各一块浸入室温硅油内，几天后胶体锋锐棱角变圆，一周后硅油已有树脂味，树脂与硅油接触部分已呈冻状。

由此可见，树脂类溶剂挥发型胶不宜做用于硅油内的光学零件胶合剂。

#### (2) 聚合固化型胶：

a. 丙烯酸胶类：苏制色球望远镜中偏

振片是丙烯酸胶合的，使用过程中已开胶；

b. 环氧树脂类胶：此类胶有六种做了浸硅油试验，见表2。

表2 做浸硅油试验的几种胶配方及部分工艺

环氧树脂	固化剂	增韧剂	稀释剂	胶合时温度
618(100)	三乙醇胺(10)	—	501环氧云 烷基醚(15)	胶前加温 至110℃×2 ~3分冷至 <40℃使用
618(100)	三乙醇胺 (10)	二乙醇 聚醚 (15)	—	加温至 110℃×2~ 3分冷至 <40℃使用
650(100)	聚酰胺651 (20)	—	—	加温70℃ 左右
618(100)	氰乙二 烯三胺 (4)	704(2)	501(15)	加温至 110~120℃
CGY-331 (100)	二乙胺基 丙胺(10)	—	—	室温

注：表中括号内数字为用量比例。

这些片子前五种在胶层完全固化后浸入44~44.5℃硅油中七个月及室温空气中九个月都未见开胶现象，最后一种经过17天42℃硅油及两个月室温空气中考验亦无变化，因此环氧胶可用于硅油内胶合件。

若在空气中需采用环氧胶，则可使用KH-550有机硅处理剂，用无水乙醇稀释至0.1~1%，涂于玻璃胶合面，乙醇挥发后，形成厚约数埃的有机硅单分子膜层，它一面与玻璃表面亲水的羟基结合，另一面以胺基对环氧胶，这样破坏了玻璃表面的亲水性，就不易开胶。

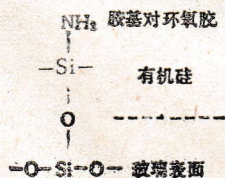


图5 有机硅作用示意图

3. 应力检验 由于有些胶固化反应太快，各部分固化不同时，待完全固化后，胶

合件内部就会残留应力，且无法消除。

我们用了三种仪器进行定性观察和定量测量。测角仪主要观测玻璃表面反射像的清晰程度，来测定由于应力引起的玻璃表面的变形。应力仪是观测玻璃和胶层由于胶收缩引起的胁强（应力）分布图。偏光光度计是测量由应力引起的附加双折射的大小，光源为汞灯5461Å单色光，因此检偏盘旋转1°，相当于程差改变3.03nm。测量结果见表3。

表3 应力检验结果

胶号	配 方	片 号	测角仪	应力仪	偏光光度计	
					检偏盘偏 转 角度	程差 (nm)
1	甲醇胶	1	像模糊			
2	α氰基丙烯酸 乙脂	1 2	像模糊			
3	618,501,三 乙醇胺,邻苯 二甲酸二丁脂	1		边缘发白, 有应力		
4	650,聚酰 胺656	1		边缘发白, 有应力		
		2	像尚 清晰	中间均匀, 边上发黑	中间16', 边上20'	0.81, 1.01
		3	像尚 清晰	较上严重 (有应力)	中间24', 边上40'	1.21, 2.02
5	己二酸缩水 甘油脂,三乙 醇胺	1 2		有应力 稍有应力		
6	618,聚醚, 三乙醇胺	1 2	像清晰	无应力 无应力	11'	0.56
7	618,501,氰 乙二烯三 胺,704	1	像清晰	无应力	11''	0.56
8	650,聚酰 胺,651,邻苯	1		无应力		
9	618,501, 三乙醇胺	1 2~4	像清晰 像清晰	无应力 无应力	7''	0.35
10	CGY-331, 二乙胺基丙胺	1~4	像清晰	无应力		
11	冷杉胶	1	像清晰	无应力		
12	加拿大液态 胶	1	像清晰	无应力		
13	中性树脂	1	像清晰	无应力		

结果表明所试各类聚合固化型胶中约有半数有程度不等的应力,但适当选择剂型可以消除应力,在使用中还应注意温度均匀及避免附加应力,以免引起胶层畸变。溶化挥发型胶都无应力。

**4. 环氧胶对P, T的影响** 有些胶,如中性树脂,对P, T有明显的影响,致使P大大下降而不能使用。因此对部分环氧胶试验片各个时期的P, T进行了测量比较,结果见表5。

此外单独对10号胶进行了测量比较,见表4。

**表4 与原膜测值比较,胶合片经过42℃×17天及室温两个月后之变化**

$\lambda$ (Å)	4861		5324		6563	
	T↑ (%)	P↓ (%)	T↑	P↓	T↑	P↓
1	3.9	0.077	2.55	0.018	1.75	0.049
2	1.8	0.025	2.5	0.002	1.65	0.001
3	2.75	0.03	3.3	0.001	2.45	0.001
4	2.15	0.04	3.0	0.003	8.25	0.000

注:原膜平均透过率对4861, 5324, 6563埃分别为38%, 37.5%, 35%。

可以看出环氧胶合片亦有T增P减现象,膜透过率越高的,变化越大,但最大P

降 $\gt 0.08\%$ ,一般在紫区P降0.03%左右,在绿红区P降 $\gt 0.003\%$ ,然后逐渐趋于稳定。因此环氧胶合片在正常老化情况下不会影响使用。

在胶合过程中存在水汽亦会导致P降和开胶,因此应在保持干燥的环境中胶合。

**5. 磨边试验** 对于需修改错边、偏振轴方位或加工定位边之偏振片,就必需具有可加工性。而溶剂挥发型胶,由于内部溶剂不易挥发,长期处于胶态,因此不宜加工磨边。我们将表5中4, 6, 7, 9号胶胶合片边上磨去1~3mm再放入45℃硅油中五个半月,未见变异,因此环氧胶合片具有良好的加工性。

**6. 实验结论** 双折射滤光器中所用偏振片建议采用表3中第9或第10号环氧胶胶合,在工作温度下胶合,固化。胶合件无应力,有较好的可加工性,可在45℃硅油中长期工作;对于空气中使用的偏振片则用中性树脂或冷杉胶为宜,以适应变化的室温。

## 五、比较

可见光区内我们产品的P与T的综合指标都已超过美国物理手册上公布的数据,图给出了典型的(P- $\lambda$ ), (T- $\lambda$ )曲线。

表5 试验片各时期的测量结果

胶号	4		6		7		9	
	T(%)	P(%)	T	P	T	P	T	P
4000	15.5	99.974	14	99.993	24.5	99.963	13.5	99.993
	16	99.975	16.75	99.990	29.5	99.972	17	99.993
	15.5	99.981	17	99.988	31.5	99.968	17	99.988
	15.5	99.974	17	99.985	31	99.968	17	99.988
4861	60.5	99.991	65.75	99.996	66	99.995	63	99.996
	58.5	99.993	64	99.992	65.5	99.991	62.5	99.992
	60	99.992	66	99.991	67	99.990	63	99.991
5324	60.5	99.993	64	99.995	64.5	99.997	64	99.997
	60.25	99.996	65	99.995	64.5	99.995	64	99.996
	59	99.993	66.5	99.992	64.5	99.992	62.5	99.993
	60	99.992	67	99.991	65	99.992	64	99.992
6563	49.5	99.994	56	99.995	58	99.997	54.5	99.996
	50	99.991	56	99.995	57.5	99.995	54	99.996
	50.5	99.994	57	99.993	59	99.993	55	99.993
	51	99.990	60	99.993	60	99.992	57	99.992

注：表中第一~四行分别为胶合后一个月；经45°C硅油浸两个月后；45°C硅油浸七个月后；及胶合后十六个月（其中包括45°C硅油浸七个月）的测值，表中T栏为对偏振光的透过率。

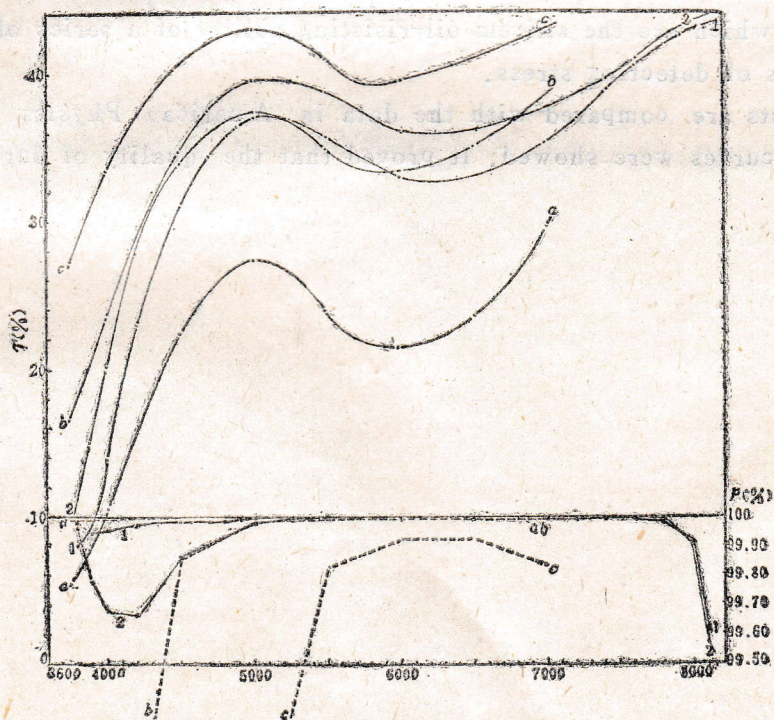


图6 磁场及精细结构望远镜所用偏振片典型曲线

1, 2为我们产品的P, T典型曲线, a, b, c, 为美国物理手册公布的HN-22, HN-32, HN-38的P, T曲线。

# THE TRIAL MANUFACTURE OF POLAROID FOR BIREFRINGENT FILTER

Hu Yue-feng Ai Guo-xiang  
(Beijing Observatory)

## Abstract

This paper introduced the important element of astronomical physical optics, H polaroid, the quality requirements and the manufactured method. A survey system was established which used perfect polarized light as light source that is better monochromatic light and successive adjustable. The precision measuring polarization and transmissivity was raised.

Using effective technique of making film, the polarization is over 99.95% at  $H\alpha$  spectral line and the transmissivity is raised to 38—40%. In range of 5000 Å to 7000 Å, high quality index was attained, than are  $p=99.99\%$  and  $T=40\%$  at mono-wavelength.

The experiment of silica oil-risisting were made, and the experimental data are showed which are the silicem oil-risisting ability of a series of cements and the results of detecting stress.

The products are compared with the data in American Physics Handbook (19 Å). The curves were showed. It proved that the quality of our products is very well.