

用于太阳向量磁场和视向速度场测量的双折射滤光器

艾国祥 胡岳风

(中国科学院北京天文台)

李挺 何凤宝 侯惠芳 顾振雷 倪厚坤

(中国科学院南京天文仪器厂)

一、引言

四十年来,双折射滤光器^[1-3]的发明和应用大大地促进了太阳单色观测,特别是太阳活动区的观测。随着双折射滤光器质量的提高,它的透过带宽已窄到足够与太阳磁敏谱线相比^[4,5]。一个明显的优点是这种滤光器是一种具有宽视场的单色器,并且它能应用于望远镜而不引入附加偏振。早在六十年代后期,我们就提出了太阳磁场望远镜的设计思想。十多年来,又不断有人提出用滤光器测量太阳磁场^[6],称为视频磁象仪,我们提出的用于太阳磁场望远镜的滤光器是1972年开始设计和研制的,1979年基本完成。这个双折射滤光器有两个透过带: $\text{FeI}\lambda 5324.19 \text{ \AA}$ 和 $\text{H}\beta\lambda 4861.34 \text{ \AA}$; 半宽分别为 0.15 \AA 和 0.12 \AA , 它们分别应用于太阳光球和色球的磁场测量; 工作温度为 42°C 。这个滤光器最重要的特点是它具有三组宽视场的KD*P电光调制器。其中一组是用作太阳向量磁场分析器,其余两组为太阳视向速度场分析器。对滤光器的性能已作了检验。一年的试观测表明它工作良好,测量太阳纵向磁场的精度为 $\pm 10\text{Gs}$ 左右,测量太阳横向磁场的精度约为 $\pm 100\text{Gs}$, 测量太阳视向速度场的精度约为 $\pm 30\text{m/s}$ 。

二、光学部分

图1为滤光器的光学示意图,它由151片, 37mm^2 的各种材料的光学元件组成。表1列出了它们的主要参数。

1、石英级

滤光器包括三个石英单元。为了在同一工作温度透过两个波带 ($\lambda_1 5324 \text{ \AA}$, $\lambda_2 4861 \text{ \AA}$), 我们需要仔细选择能在两个透过带相匹配的干涉级。干涉级的公式为 $m = \mu d / \lambda$, 这里 μ 是晶体的双折射率, d 为晶体厚宽, 按照文献 [7] 我们得到 42°C 时, $\mu_1 = 0.009173418$, $\mu_2 = 0.009268736$, 故

$$m_2 = \frac{\mu_2 \lambda_1}{\mu_1 \lambda_2} \cdot m_1 = 1.1066188 m_1 \quad (1)$$

然后,我们可以找出 m_1 和 m_2 同时为半整数或整数的匹配数。这些匹配数为 9.5 和 10.513;

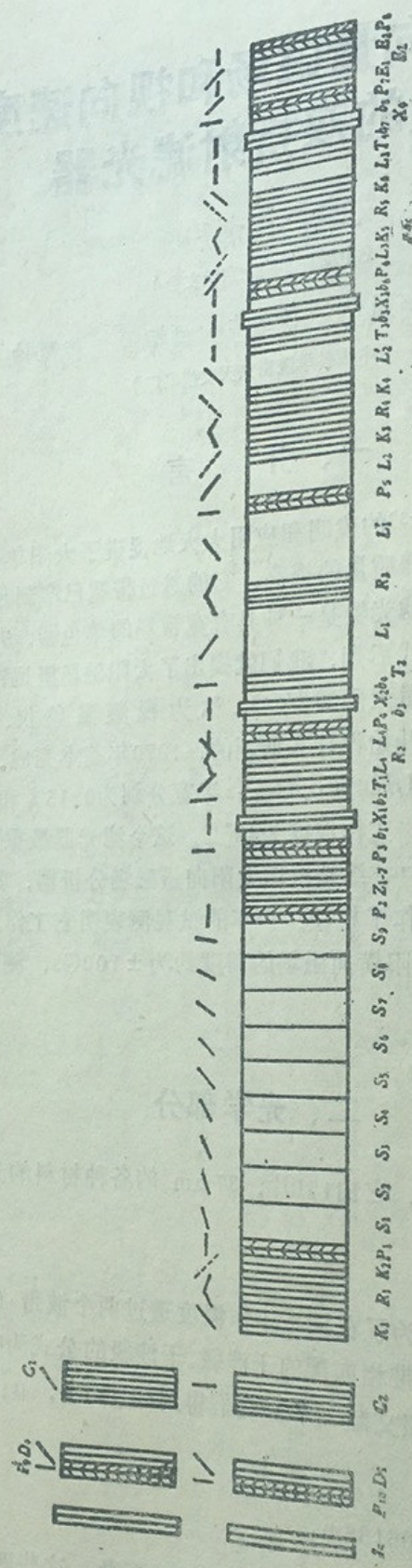


图1 滤光器光学示意图

表1 滤光器光学元件表

编号	名称	材料	厚度 (MM)	轴向 误差	光轴方位	滞后级数	
						5324Å	4861Å
L_1, L_1	Lyot 宽场单元	冰洲石	23.5112	0.1	$-45^\circ, +45^\circ$	7696	9560
I_2, L_2	Lyot 宽场单元	冰洲石	11.7556	0.1	$-45^\circ, +45^\circ$	3848	4280
L_3, L_3	Lyot 宽场单元	冰洲石	5.8778	0.1	$-45^\circ, +45^\circ$	1924	2140
L_4, L_4	Lyot 宽场单元	冰洲石	2.9389	0.1	$-45^\circ, +45^\circ$	962	1070
S_{1-9}	Solc 级2 $\left[\begin{array}{l} \text{扇型级} \\ \text{余弦变尖} \end{array} \right]$	石英	11.4339	2'	$6^\circ 14', 13^\circ 51', 22^\circ 51',$ $33^\circ 14', 45^\circ 00', 56^\circ 46',$ $67^\circ 09', 76^\circ 09', 83^\circ 46'$	197	218
Z_{1-7}	Solc 级1 $\left[\begin{array}{l} \text{折叠型} \\ \text{三角变尖} \end{array} \right]$	石英	2.1766	2'	$4^\circ 30', -4^\circ 30', 9^\circ 00',$ $-9^\circ 00', 9^\circ 00', 4^\circ 30',$ $4^\circ 30'$	37.5	41.5
E_2	Evans 中央级	石英	1.1021	2'	0°	19	21
E_1, E_3	Evans 旁级	石英	$d=0.2755$	2'	45°	4.75	5.25
D_4	4861Å 定标 $\lambda/4$ 波片	石英	$d=0.9131$	2'	45°		0.25
D_5	5324Å 定标 $\lambda/4$ 波片	石英	$d=0.0145$	2'	45°	0.25	
C_1	消色差(三单元) $\lambda/4$ 波片	石英		2'	45°	0.25	0.25
C_2	消色差(三单元) $\lambda/4$ 波片	石英		2'	90°	0.25	0.25
R_{1-5}	消色差旋转 90° 波片	石英		2'	$22^\circ 30', 67^\circ 30'$		
X_{1-4}	调波长用可转 $\lambda/2$ 波片	石英	$d=0.0290$	2'		0.50	
T_{1-4}	调波长用可转 $\lambda/4$ 波片	石英	$d=0.0145$	2'	$0^\circ, 90^\circ$	0.25	
K_{1-6}	电光晶体	KD*P	2.5	2'	$0^\circ, 45^\circ$		
P_{1-11}	偏振片				$0^\circ, 90^\circ$		
I_4, I_5	干涉滤光片						
b_{1-8}	填充玻璃	K ₉					

(厚度栏中凡标“d=”者,为两片相减。

19和21.0257; 37.5和41.498; 197和218.004, 等等。计算表明, 当我们将 λ_1 选择 $m_1=9.5$, 对 λ_2 选择 $m_2=10.5$ 作为滤光器的基级, 而又仅采用Evans和Lyot单元的话, 就不可能对 λ_1 和 λ_2 分别获得 0.15 \AA 和 0.12 \AA 的半宽。所以我们应用一级Evans级, 其对 λ_1 的干涉级为9.5和19(对 λ_2 为10.5和21), 还有二组Solc级^[8]: 其一是角差分布为三角变尖函数的折叠型级, 它的基本干涉级对 λ_1 为37.5(对 λ_2 为41.5), 由七片组成。另一组是余弦变尖函数的扇型级, 它的基本干涉级对 λ_1 为197(对 λ_2 为210), 由九片组成。第二组Solc级的半宽对 λ_1 和 λ_2 分别为 2.40 \AA 和 1.95 \AA 。Solc级的另一优点是减少了偏振片的数目, 增加了滤光器的透过率。在滤光器完成之后, 发现两组Solc级不能与后面的Lyot级严格匹配, 这使得寄生光增加约1%。1981年, 我们发展了一种等富里叶系数滤光器的理论, 即各种双折射滤光器严格匹配的理论。使晶体数大于2片的等富里叶系数滤光器与后面的Lyot级或Evans级严

格匹配。如果用以上这个设计,将会取得更好的结果。两组Solc级是由石英做成,这些石英片的厚度误差不大于 0.1μ ,这可由双折射晶体定轴测厚仪测出来⁽¹⁰⁾。 0.1μ 的厚度精度保证了滤光器的优良的轮廓,它非常接近于理论轮廓。

2. 冰洲石级

滤光器的最后四级为Lyot可调宽视场级,它们是由冰洲石做成。在长达十年的时间内,我们查访了许多冰洲石矿点,获得了大量块度足够大的冰洲石。从中选出了最好的晶体来加工Lyot级。图2为冰洲石晶片的样品。光轴躺在晶片表面的误差约为 $0'.1$,这是由X光衍射

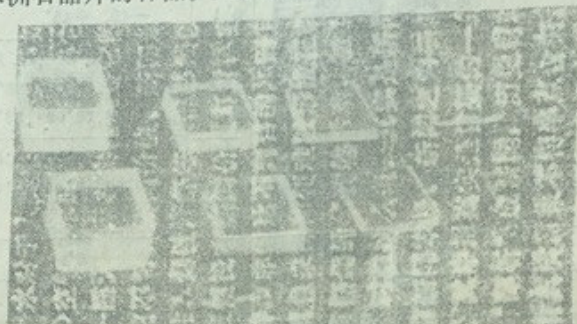


图2 八片冰洲石晶片样品

测角仪仔细测定的。为了克服光电流在峰值衍射角附近的变化不灵敏,我们采用了等偏离测量法。晶片经过小心仔细地抛光,并且在激光干涉仪中对光程进行局部修改,所以每片冰洲石晶体的厚度均匀性误差都小于 $\frac{1}{40}$ 双折射波长。所有冰洲石晶片的最后厚度,都是在 $42^\circ.00C$ 定至 $\lambda_2 4861 \text{ \AA}$ 处为整数波长。当滤光器在 λ_2 工作时,就无需转动透过带调节装置,因此调节装置中的 $\frac{\lambda}{2}$ 和 $\frac{\lambda}{4}$ 波片仅做成 $\lambda_1 5324 \text{ \AA}$ 的波片,而不必消色差。

3. KD*P电光调制器

KD*P电光调制器是磁场(或称偏振光)和速度场分析器的关键部份。它们也是滤光器的最复杂和最困难的部分。KD*P晶体来源于山东大学和福州物质结构研究所。因为它极易潮解,所以我们采用了晶体两面同时抛光的新工艺⁽¹¹⁾。完全抛好以后,为了防潮,立即将晶片放入274号硅油中。为了减少光的反射损失,在滤光器中也是填充了此种硅油。宽视场KD*P调制器是由两片KD*P晶片所组成,当分别在两片晶体上加反向高压时,它们的滞后轴是相互垂直的。在两晶片之间放置一组旋转 90° 波片。我们制造了高透明 SnO_2 薄膜导电玻璃,并用于调制器中⁽¹²⁾。12片导电玻璃在274号硅油中的积分透过率对 λ_1 为0.89,对 λ_2 为0.87。当装配KD*P和导电玻璃时,它们之间的油膜厚度应保持固定,并且厚度应尽可能小。这样半波电压就是稳定的和较小的。KD*P调制器的作用原理在文献[13]中作了介绍。

4. 消色差波片偏振等

为了保证滤光器有足够的视场,冰洲石级和KD*P调制器都被设计成宽视场的消色差级。它是由两片 $\frac{\lambda}{2}$ 波片组成,而取代了原来Lyot I型宽场级中的一片 45° 方向的 $\frac{\lambda}{2}$ 波片。

(图3 a) 为它的结构^[14]。两片 $\frac{\lambda}{2}$ 波片的光轴方向分别为 $22^\circ.5$ 和 $67^\circ.5$ 。合成波片的效果是使得偏振平面旋转 90° ，例如在图4 (a) 中，OA 和 OB 方向都旋转 90° ，但在用 $\frac{\lambda}{2}$ 波片时，如 OA 方向旋转 90° ，则 OB 方向旋转 -90° 。因为这两种结构之间有一个位相差，所以在使用合成波片时，滤光级的两块偏振片轴应该是相互正交，而不象 Lyot I 型宽场级中是相互平行的。由 (1) 式对 λ_1 是半波片，对 λ_2 就变成 $\frac{1}{2}(1+\alpha)$ 波片了， $\alpha=1.1066$ ；而组合波片使得偏振平面对 λ_1 旋转 90° ，而对 λ_2 偏振平面的旋转角为：

$$\operatorname{tg} \phi = \sqrt{1 - \frac{1}{4}(1 - \cos \alpha)^2} / \frac{1}{2}(1 - \cos \alpha). \quad (2)$$

若 $\lambda_2 = 4861 \text{ \AA}$ ，则 $\phi = 88^\circ 41'$ ，所以有 99.92% 的能量旋转到了 90° 方向。如果取 $\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2)$ ，则 $\alpha = 0.1066/2$ ，对 λ_1 和 λ_2 都有 $\psi = 89^\circ 06'$ ，这样就有 99.995% 的能量旋转到 90° 方向。由此可见，组合波片的消色差质量是很好的。

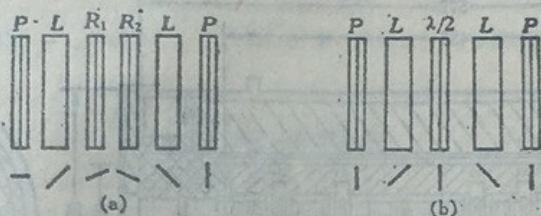


图3 (a) 宽视场消色差单元, (b) Lyot I 型宽视场单元

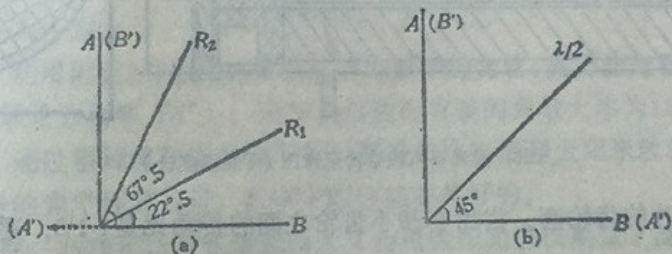


图4 (a) 使偏振面旋转 90° 的消色差组合波片的作用, (b) $\lambda/2$ 波片的作用。

在调波带装置中有 $\frac{\lambda}{4}$ 和 $\frac{\lambda}{2}$ 波片，如这些波片不是消色差的，那将会产生附加散射光^[15]。

如 $\frac{\lambda}{2}$ 和 $\frac{\lambda}{4}$ 波片的位相误差分别为 $2e$ 和 e ，那么透过率公式就成为：

$$\begin{aligned} \tau = & \cos^2(\sigma + 2\psi) + 4\sin^2\psi \sin^2 e \cos \sigma [\sin^2\psi \cos \sigma + \cos(\sigma + 2\psi)] \\ & + 4\sin 2\psi \cdot \sin(e/2) \sin \sigma \cdot [\sin 2\psi \sin^2(e/2) \sin \sigma \\ & + \cos(\sigma + 2\psi) + 2\sin^2\psi \sin^2 e \cos \sigma]. \end{aligned} \quad (3)$$

这里 σ 是冰洲石级的位相差， ψ 是 $\lambda/2$ 波片转动角。当 $\psi = 0^\circ$ 或 90° 时，(3) 式就变成

$$\tau = \cos^2 \sigma. \quad (4)$$

所以如果 σ 对 λ_2 是整数 π ，则 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片的误差对 λ_2 就不产生附加散射光。

在磁场分析器中，为了精确测量 λ_1 、 λ_2 的向量场，我们应用了二组三单元消色差 $\lambda/4$ 波片^[16]。所应用的偏振片具有85%的透过率。这些偏振片是我们与北京第三光学仪器厂联合研制的^[17]。按Lyot的公式，当光线的入射角为 $36'$ 或 $24'$ 时（相当于望远镜的半视场 $3'$ 或 $2'$ ），那离轴效应所产生的最大波长偏移为 0.054\AA 或 0.024\AA 。如果我们使边缘和中心取等偏离，那最大波长偏移为 $\pm 0.027\text{\AA}$ 或 $\pm 0.012\text{\AA}$ ，这相当于 $\pm 0.15\text{km/s}$ 或 $\pm 0.07\text{km/s}$ 的伪视向速度场。因为这些偏离是一个系统误差，所以它们能作系统校正。

三、机械结构和恒温器

1. 机械结构

图5给出了滤光器的示意图。晶体是被安装在由LC₄铝合金做成的方形小室中。这种金属不仅具有良好的热传导和机械性能，而且不会污染硅油。这些晶体室经精心加工，使得所有光学片的平行误差和边的定向误差都小于 $2'$ 。共有五个晶体室，在每两个晶体室之间都有

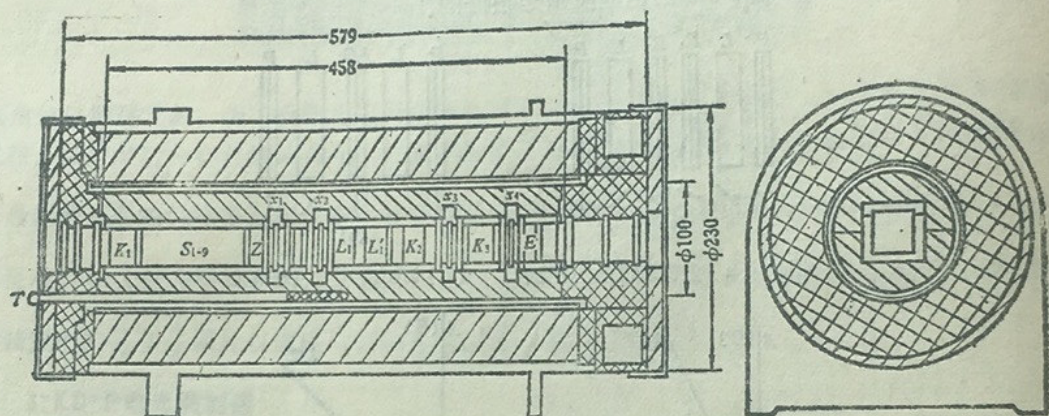


图5 滤光器机械结构示意图 (T是温度计)

一个其中装有 $\lambda/2$ 波片的齿轮套。齿轮套和小齿轮之间的传动比是1:8。通过连杆，聚四氟乙烯联轴节和斜齿轮将旋转传到 $\lambda/2$ 波片。借助于望远镜面板上的刻度盘，我们能手动旋转 $\lambda/2$ 波片，调整滤光器透过带。为了防止滤光器漏硅油，采用氟橡胶作为旋转密封材料，因为它在硅油中无溶胀现象。这几年来硅油就没有从旋转件处漏出。因为硅油、光学材料和铝合金的膨胀系数都不一样，而它们之中硅油的膨胀系数最大，故而在滤光器前端装置了一个小室，它与滤光器内部是联通的，当滤光器加热时，膨胀的油可以进入小室，从而避免了漏油。有不少材料会污染硅油，减小硅油的透过率。在使用了一年半之后，我们取出硅油，再次测量其透过率。1cm厚的硅油对 λ_1 和 λ_2 的透过率分别为0.748和0.68。在滤光器中油的通光总厚度约为1mm，故对 λ_1 和 λ_2 的透过率分别为0.971和0.962。这表明在滤光器中所用的材料对硅油的污染仅是微量。

2. 恒温器

滤光器工作温度为 42°C 。对于要求精度为 $\pm 0.1\text{km/s}$ 的视向速度场的测量，最厚的冰洲

石级的恒温精度应为 $\pm 0^{\circ}.005\text{C}$ 。恒温器是由一个中央恒温器及二个端面恒温器所组成。中央恒温器是一个电桥，它同时作为加热器和检测器。其两个臂是由锰铜丝做成，另二个臂是由铜丝做成。示意图见图6。为了保证恒温器的稳定性，在它外部是一个厚度为47mm的泡沫塑料筒，它是一种优良的绝热材料。47mm的厚度值是由差分网格法计算确定的。两个端面恒温器与中央恒温器是相似的，但精度较低，它们是为了避免（特别是在冬天），晶体室温度分布的变化。在滤光器中间装有格值为 $0^{\circ}.01\text{C}$ 的精密温度计。借助于一个放大五倍的小望远镜对温度计读数，故可估读到 $0^{\circ}.001\text{C}$ 。

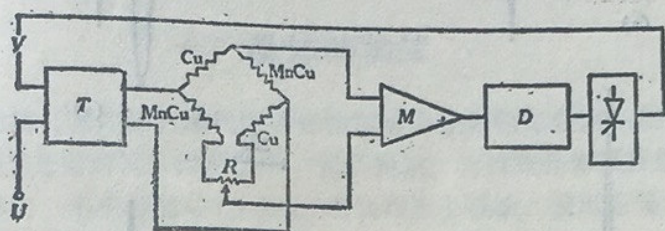


图6 恒温器电路示意图

(V. 加温电压, U. 测量电压, T. 转换门, M. 放大器, D. 判相及形成触发)

四、性能检测

滤光器机电总装结束后，进行了几项性能测试，结果如下。

1. 透过率：用氢灯的H β 作光源，滤光器（不带干涉滤光片）的透过率约为6.2%，与理论计算结果基本一致。

2. 分辨率：利用附有2号鉴别率板的Cp550型平行光管，测得滤光器的分辨率优于5"，接近32mm直径的理论分辨率（4"）。因为望远镜准直镜的角放大率为12倍，故相当于望远镜分辨率为0".4。通过望远镜和滤光器，我们能清楚地观测到太阳米粒和太阳黑子的半数纤维。这表明滤光器的光学性能良好，KD*P的性能亦是好的。

3. 透过带轮廓：1979年12月在紫金山天文台用太阳光谱仪测试了滤光器的光谱轮廓。图7和图8给出了滤光器的光谱。它与理论轮廓良好地一致。

4. 三年来表明滤光器机械性能良好。

5. 在1982年11月进行了连续三昼夜的恒温测试。温度计附近（滤光器的中心部分）温度的稳定性约为 $\pm 0^{\circ}.001\text{C}$ 。

目前滤光器工作良好。

在滤光器的研制过程中，得到紫金山天文台太阳物理研究室、福州物质结构研究所晶体组、山东大学化学系、北京602厂、北京第三光学仪器厂、南京天文仪器厂光学车间以及苏定强、王亚男、李开寿、陈在德、明长荣、朱永年、黄祥金、代美英、钱忠钰和史忠先同志的帮助，特此一并致谢。

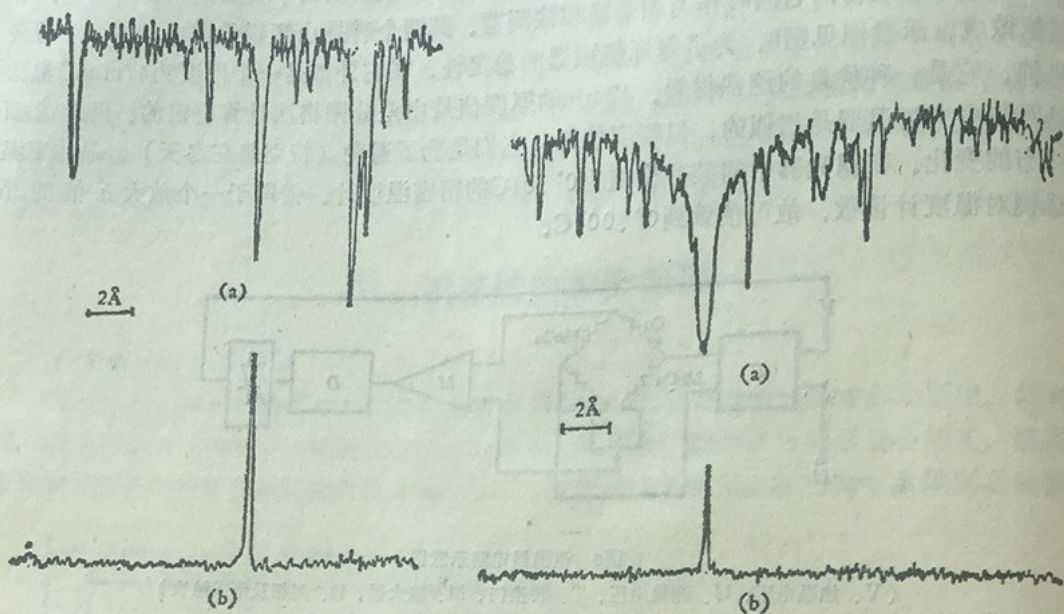


图7 (a) $\lambda 5324 \text{ \AA}$ 附近的太阳光谱,
(b) $\lambda 5324 \text{ \AA}$ 附近, 滤光器和太阳光谱的合成透过轮廓

图8 (a) $H\beta (4861 \text{ \AA})$ 附近的太阳光谱,
(b) $\lambda 4861 \text{ \AA}$ 附近滤光器和太阳光谱线的合成透过轮廓

参 考 文 献

- [1] Lyot, B., *Ann. Astrophys.*, 7 (1944), 31.
- [2] Evans, J. W., *J. Opt. Soc. Am.*, 39 (1949), 229.
- [3] Solc, I., *ibid.*, 55 (1965), 621.
- [4] Steel W. H., *Austra. J. Phys.*, 14 (1961), 201.
- [5] Beckers, J. M., *Appl. Opt.*, 14 (1975), 2061.
- [6] Hagyard, M. J. & Teuber, D., *Solar Phys.*, 80 (1982), 33.
- [7] Smart, R. N., *J. Opt. Soc. Am.*, 49 (1959), 710.
- [8] Fredga, K. & Hogbom, J. A., *Solar Phys.*, 20 (1971), 204.
- [9] 艾国祥等, *光学学报*, 2 (1982); 217.
- [10] 杨还、胡岳风, *北京天文台台刊*, 1977, 11: 41.
- [11] 何凤宝, *光学技术*, 1982, 1: 19.
- [12] 胡岳风、艾国祥, 同上1980, 1: 17.
- [13] 艾国祥、胡岳风, *天体物理学报*, 1 (1981), 273.
- [14] Koester, C. J., *J. Opt. Soc. Am.*, 49 (1959), 405.
- [15] Goyaneli, R. G. & Jefferies, J. T., *Austra. J. Phys.*, 7 (1954), 254.
- [16] Pancharatnam, S., *Proc. Indian. Acad. Sci.*, 41A (1955), 137.
- [17] 胡岳风、艾国祥, *光学技术*, 1981, 1: 32.