

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)

摘 要

本文阐述了用于太阳磁场测量的一种新的双折射滤光器,它是一种宽视场的单色器,可同时接收许多信号用于实时观测,当应用于望远镜时不会引入附加偏振。

滤光器有两个透过带,一为 $\text{FeI}\lambda 5324 \text{ \AA}$, 半宽 $0.15 \text{ \AA}$, 另一个为 $\text{H}_\beta\lambda 4861 \text{ \AA}$, 半宽 $0.12 \text{ \AA}$ 。透过带的调节范围为 $\pm 1.2 \text{ \AA}$, 透过率约为 0.06, 晶体尺寸为 $37 \times 37 \text{ mm}^2$, 分辨率约为 $5''$, 对望远镜这个分辨率相当于约 0.4 , 工作温度为 42°C , 恒温精度约为 $\pm 0.001^\circ\text{C}$ 。此滤光器特有三组宽视场电光调制器,可用作分析向量磁场和视向速度场。

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为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],但那是一种视频磁象仪。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 $0.15 \text{ \AA}$ 和 $0.12 \text{ \AA}$, 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 $\pm 30\text{m/s}$ 。

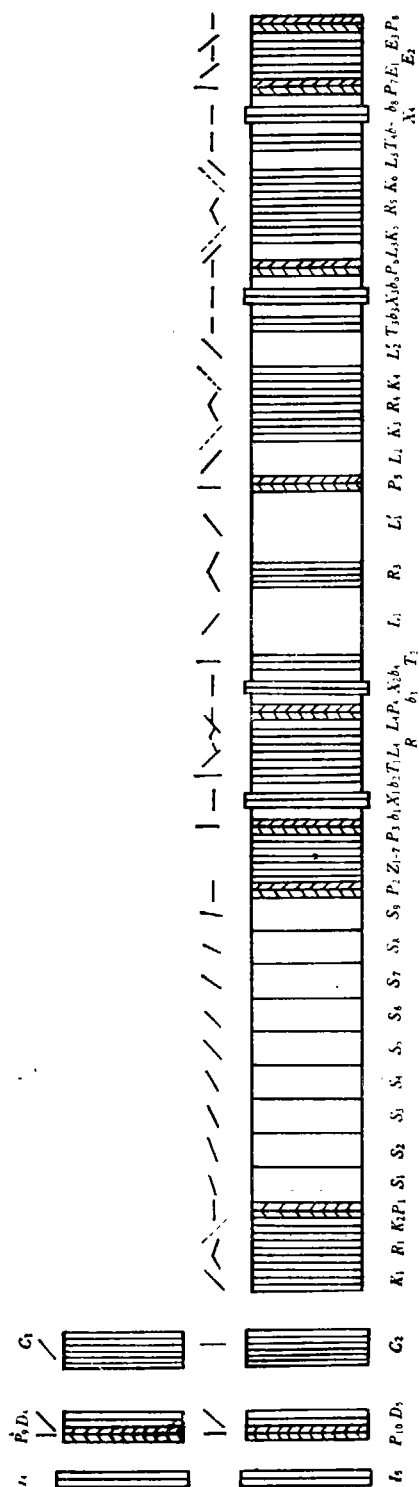


图 1 滤光器光学示意图

二、光 学 部 分

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

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	
						5324 Å	4861 Å
L_1, L_1	Lyot 宽场单元	冰洲石	23.5112	0.1	$-45^\circ, +45^\circ$	7696	8560
L_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 [扇型级 余弦变尖]	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 [折叠型 三角变尖]	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	4861 Å 定标 $\lambda/4$ 波片	石英	$d = 0.0131$	2'	45°		0.25
D_5	5324 Å 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'	$\pm 45^\circ$		
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 ₂					

* 厚度栏中凡标“d=”者,为两片相减.

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 ($\lambda_1 5324 \text{ Å}$, $\lambda_2 4861 \text{ Å}$), 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 为晶体厚度, 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; 19 和 21.0257; 37.5 和 41.498; 197 和 218.004, 等等. 计算表明,当我们对 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 $0.15 \text{ \AA}$ 和 $0.12 \text{ \AA}$ 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 $2.40 \text{ \AA}$ 和 $1.95 \text{ \AA}$. 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能与后面的 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

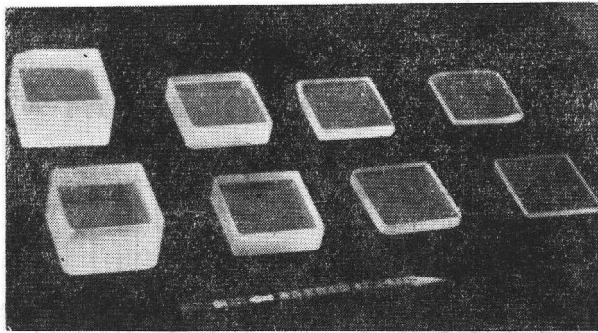


图 2 八片冰洲石晶片样品

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 42.00° 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,在滤光器中也是充填了此种硅油。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. 消色差波片偏振片等

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 22.5° 和 67.5° 。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° ,但在用单块 $\frac{\lambda}{2}$ 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 $\lambda = \frac{1}{2}$

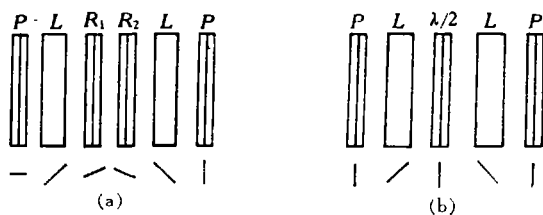


图 3 (a) 宽视场消色差单元, (b) Lyot I 型宽视场单元

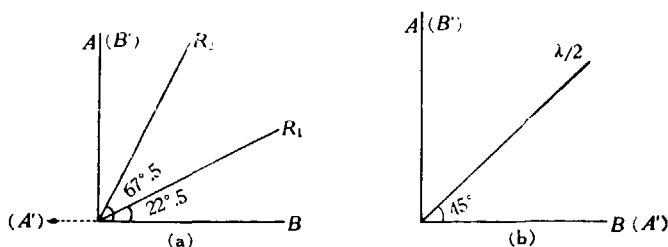


图 4 (a) 使偏振面旋转 90° 的消色差组合波片的作用, (b) $\lambda/2$ 波片的作用。

$\cdot(\lambda_1 + \lambda_2)$, 则 $\alpha = 0.1066/2$, 对 λ_1 和 λ_2 都有 $\phi = 89^\circ 06'$, 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.

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 2ε 和 ε , 那么透过率公式就成为:

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

这里 σ 是冰洲石级的位相差, ϕ 是 $\lambda/2$ 波片转动角. 当 $\phi = 0^\circ$ 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, 当光线的人射角为 $36'$ 或 $24'$ 时(相当于望远镜的半视场 $3'$ 或 $2'$), 离轴效应所产生的最大波长偏移为 $0.054 \text{ \AA}$ 或 $0.024 \text{ \AA}$. 如果我们使边缘和中心取等偏离, 那么最大波长偏移为 $\pm 0.027 \text{ \AA}$ 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

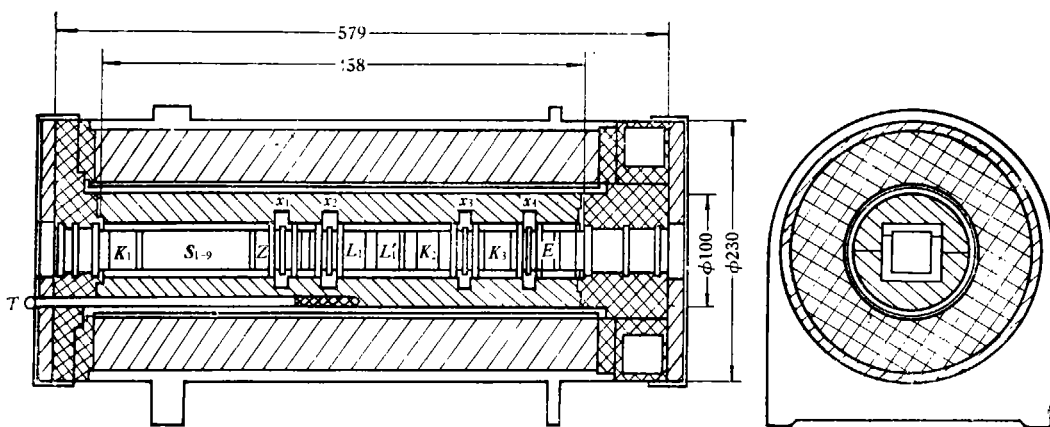


图 5 滤光器机械结构示意图 (T 是温度计)

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

一个其中装有 $\frac{\lambda}{2}$ 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 $\frac{\lambda}{2}$ 波片。借助于望远镜面板上的刻度盘,我们能手动旋转 $\frac{\lambda}{2}$ 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 $\pm 0.005^\circ\text{C}$ 。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

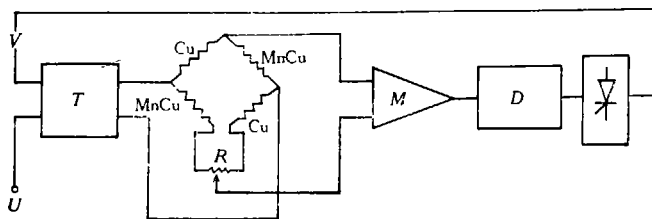


图 6 恒温器电路示意图

(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)

布的变化。在滤光器中间装有格值为 0.01°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 0.001°C 。

四、性能检测

滤光器光机电总装结束后,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影纤维。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.

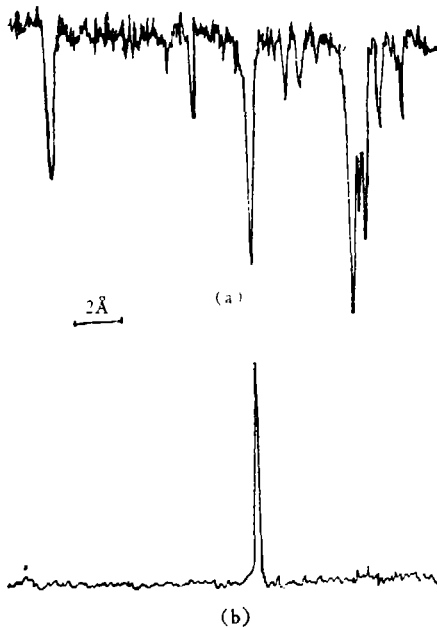


图 7 (a) $5324 \text{ \AA}$ 附近的太阳光谱,
(b) $5324 \text{ \AA}$ 附近, 滤光器和太阳光谱的合成透过轮廓

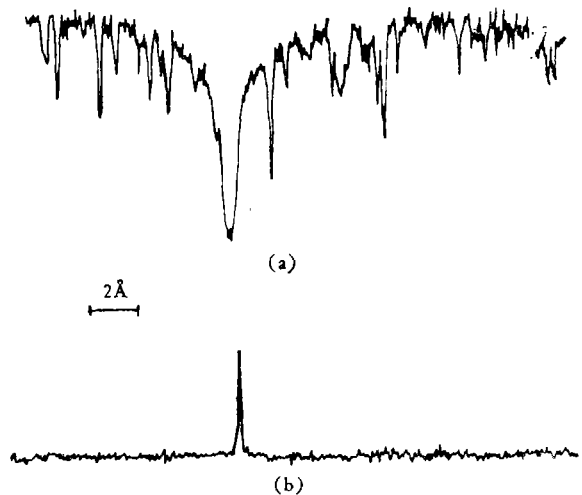


图 8 (a) $H_{\beta}(4861 \text{ \AA})$ 附近的太阳光谱,
(b) $4861 \text{ \AA}$ 附近滤光器和太阳光谱的合成透过轮廓

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(滤光器的中心部份)温度的稳定性约为 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$.

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.

参 考 文 献

- [1] Lyot, B., *Ann. Astrophys.*, **7** (1944), 31.
- [2] Evans, J. W., *J. Opt. Soc. Am.*, **39** (1949), 229.
- [3] Sole, 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] 杨述、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] Gioyaneli, 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.