

多通道双折射滤光器

—— I. 原理和视频光谱仪

艾国祥 胡岳风

中国科学院北京天文台

摘要

在双折射滤光器中,用组合偏振光束分离器代替传统的偏振片,使滤光器的出射成为振动彼此垂直、光谱彼此互补的两束偏振光,即产生两个通道。当这种级连续使用时,能产生多通道双折射滤光器。当使各通道透过带连续分布于谱线附近光谱区时,能产生新型的视频光谱仪。文中还讨论了视频光谱仪的各种结构特性和优良性能,以及在太阳物理研究中如何防止太阳辐射生热的问题。

一、前言

当前研究太阳物理的光学仪器主要有两大类,一类是以光栅光谱仪为代表的光谱仪,另一类是双折射滤光器为代表的单色仪。这两类仪器都有了较长的历史,在太阳物理研究中发挥了巨大的作用,目前都在不断发展和完善。两类仪器都有其独到之处,但也存在明显的不足。光谱仪可获得很高光谱分辨率(10^6)的很宽范围的同时光谱,但同时可观测的视场只是一条狭缝,不能同时获得视面光谱。法国的Mein^[1]进行了多狭缝光谱仪实验,以图获得稍大一点的视场。另一类扩大视场的办法是^[2]将视面上的点光源由光导纤维引入狭缝进行光谱观测,这种办法不能用于视面天体,如太阳。与光谱仪正相反,以滤光器为代表的单色器能同时获得视面天体单色像,但不能获得同时的光谱。最近一个时期制成的万能双折射滤光器^[3],通过调节波长装置,在可见光区仅能获得不同时光谱分布。寻找一种新仪器能同时具备以上两类仪器的优点是太阳物理研究的迫切需要,也是仪器向前发展的方向。

本文发展了一种新系统——多通道双折射滤光器^[4]。通过使用组合偏振光束分离器代替原有的偏振片,使滤光器一级的出射分为彼此互补的两束凹槽光谱以实现多通道观测。在此基础上提出视频光谱的设想,并探讨了视频光谱仪的有关形式及优良性能。

二、多通道双折射滤光器原理

1. 偏振光束分离器

早在1974年,Banning^[5]发明一种偏振光束分离器(简称偏光器),利用Brewster角反射原理,选择多层膜膜层,当层数足够多时,反射和透射的光束差不多由交叉的线偏振光组成,如图1所示,其S和P成份为交叉的线偏振光。此后,进行了一系列研究,改进了全色性能、视场、透过率及材料稳定性等^[6-8]。

目前这类偏光器的偏振度一般为99%以上,好的可达99.5%,视场可用于焦比8:1的会聚光中,工作波长范围可达3000Å左右,膜层数一般为8-10层,光的吸收一般小于10%,优质的可小于3%,透射性能比偏振片要好,偏振片一般吸收15%左右。

2. 组合偏振光束分离器(简称组偏器)

在传统的双折射滤光器中^[9, 10]使用偏振片,它只让轴向线偏振光通过,而把垂直方向的光吸收转化为有害的热量。与偏振片不同,偏光器利用两束光,使光信息率提高一倍。但它虽已发明进四十年却从未有滤光器使用过它。主要因为:偏振度只有99%,达不到滤光器所要求的99.9%;体积大,价格稍高,所以在双折射滤光器的使用中长期无人问津。为了克服它偏振度低的特点,我们设计了组偏器,如图2所示。在其两束光之后附加两片低偏振度的偏振片,其偏振度~90%,若偏光器偏振度为99%,则组偏器的偏振度为:

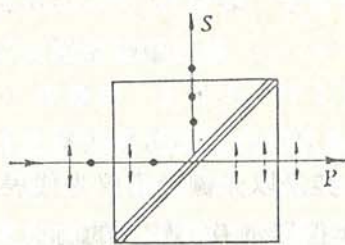


图1. 偏振棱镜

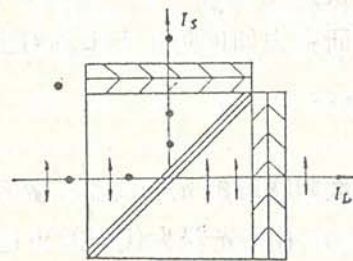


图2. 组合偏振光束分离器

$$P = 1 - (1 - 0.99) \times (1 - 0.9) = 0.999$$

就可满足滤光器要求的99.9%。由于偏振度90%的偏振片透过可达95%以上,所以组偏器的透过率在85%至92%之间,比单独的偏振片要稍高些。随着多层膜技术的提高,可望达到更高的透过率。

3. 多通道滤光器原理

在单级的Lyot^[9]滤光器中,当 $P_2 \parallel P_1$ 时,其透过率为: $\tau_{\parallel} = \cos^2 \pi \frac{\mu d}{\lambda}$, 其中 μ 为双折射率, d 为厚度。

当 $P_2 \perp P_1$ 时,透过率为: $\tau_{\perp} = \sin^2 \pi \frac{\mu d}{\lambda}$, 这两个透过率是互补的,即 $\tau_{\parallel} + \tau_{\perp} \equiv 1$ 。

由于同一时刻偏振片只能取一种状态,所以只能得到一束出射光,形成单通道。当出射偏振器采用组偏器时,如图3所示,可以得到光谱上互补的两束光 I_{\parallel} 和 I_{\perp} ,形成了二通道。下面用三级多通道滤光器的结构图(图4)和光谱透过轮廓图(图5)来进一步展示其工作原理。从图5不难看出,八个通道连续地排列在一段光谱之中,通过相应的滤光片(在传统双折射滤光器中一般称为前置滤光片,但在多通道中一般放在

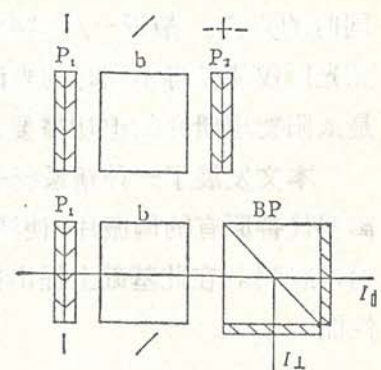


图3. 多通道滤光器与传统滤光器差别

各通道之后,也可称后置滤光片),以实现各通道的隔离。与传统双折射滤光器不同,实现通道分离,必须将干涉级数高的级用在光路的前部,否则得不到匹配的各个单通道滤光器,各通道不能都获得峰值透过,这个特点是实现多通道滤光器的构思关键,也是它区别于传统滤光器的主要结构特征。

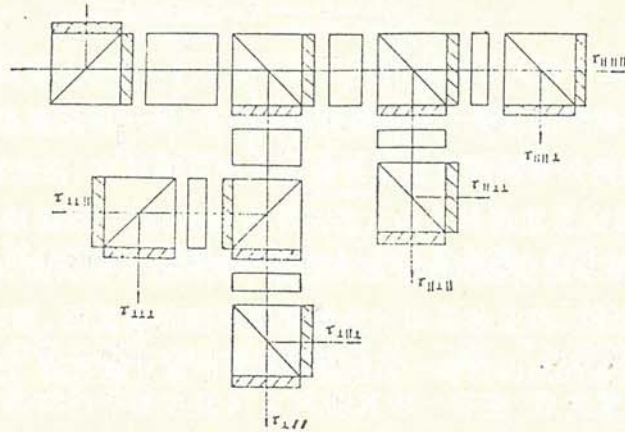


图4. 八通道结构示意图

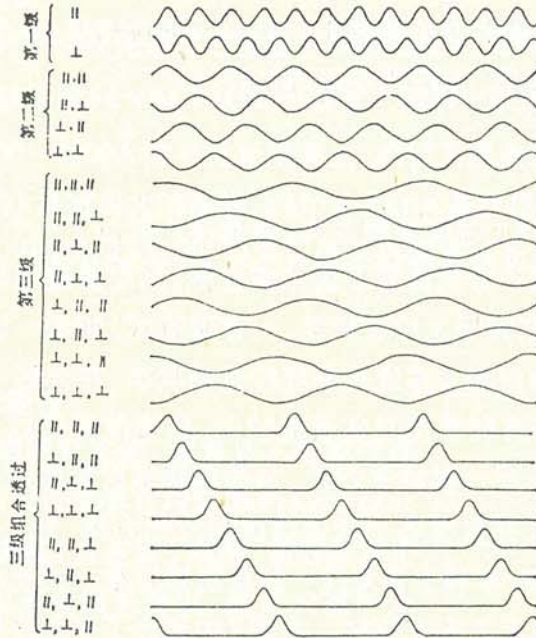


图5. 八通道出射轮廓图

4. 多通道实体 Michelson 偏振干涉滤光器

人们把 Lyot-öhman 滤光器称为双折射滤光器,这是根据所用材料而言的,从原理上讲,叫偏振干涉滤光器也许更为合适。早在1949年 Evans^[10]就提出过用两束光的偏振干涉实现更窄透带的设想。此设想在改进之后为 Title 和 Ramsey^[11]所实现。这种系统被称为实体 Michelson 偏振干涉滤光器,它的出现使滤光器的光谱分辨率有可能达到和超过光栅光谱仪,达到 0.01\AA 左右,或 >60 万左右。在实体 Michelson 系统中,同样可以实现多通道。如图6所示。这个系统与双折射系统原则上相同,但有两点差别:第一,从组偏器出来,进入实体 Michelson 偏振干涉级的线偏振光需要旋转 45° 角,以适应实体 Michelson 偏振干涉级的方位需要。我们加了一片方位为 22.5° 的 $\frac{\lambda}{2}$

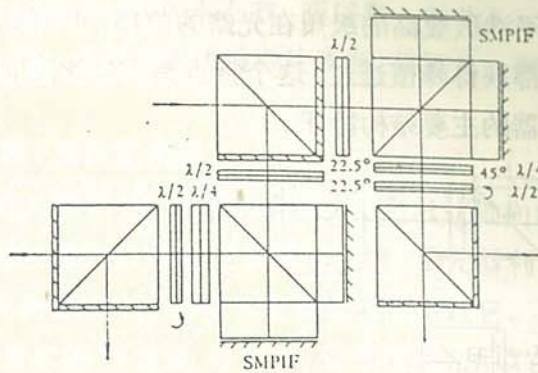


图6. 多通道实体Michelson偏振干涉滤光器

波片,使线偏振光旋转 45° ;第二,从实体Michelson偏振干涉级出射的光,经过 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 调节波长装置之后,应有一块其轴与 $\lambda/4$ 波片轴平行的偏振器相接,如Lyot滤光器中那样,也是考虑到其后使用组偏器以实现通道分离,组偏器出射线偏振光方向取 0° 和 90° 方向,这在调节波长装置中引起 $\pi/4$ 的位相差,这个问题在调节波长装置中并不出现任何实际变化,而仅需加以理解而已。

5. 垂直与平行排列模式

多通道光束走向和排列上存在多种方式,组偏器入射占了一个方向,平行出射占一个方向,还有上下左右四个方向留给反射光束选择,所以多通道滤光器可根据需要作多种结构上的安排。这些安排大体有两类,一称垂直式,即每一块组偏器分出的两个光束彼此垂直,这种结构保持了多通道系统的原始状态,在光路中不需要再增光学附件,结构简单,这种结构有利于使用在通道较少,而接收器可以分立的情况下,如少数几个通道的照相观测;另一类称平行式,由组偏器出射后经过全反射棱镜,最后一律沿望远镜主光路传播,并且将各个通道排成相应的方阵,如 2×2 、 3×3 、 4×4 等。这种结构使滤光器结构紧密,有利于设置统一的恒温器和统一的光电接收器,如CCD块阵等。在图2、3、4中均出示了垂直结构。在图7中出示了平行结构,这是 2×2 阵的立体结构。

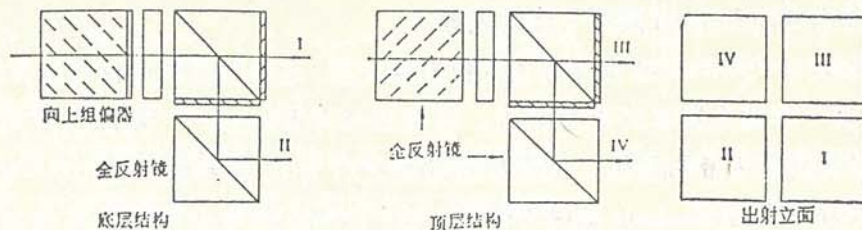


图7. 平行结构示意图

三、视频光谱仪

本节主要采用多通道滤光器的原理,发展一种视频光谱仪,并讨论它的各种形式

及有关特性。

1. 多通道与组偏器的数值关系

从图5中不难看出,多通道的数目决定于组偏器的数目,有下面的关系

$$M = 2^N$$

其中N为滤光器级数,当 $N = 1, 2, 3 \dots 11, 12$ 时, $M = 2, 4, 8 \dots 2048, 4096$ 等。组偏器数为 $M - 1$ 。这里要说明一点,在所有组偏器中至于最前面的第一块组偏器,它的功能与其后各块稍有差别,它只把自然光分为彼此垂直的两束线偏振光,即起到起偏器的功能,而其余的组偏器,它的出射光不仅在方向上是垂直正交的,而且所产生的凹槽光谱也是互补的,因而所产生的两个通道所孤立的光谱范围不是独立的。第一块组偏器只取分光束作用,而其后的凹槽光谱完全可以独立的,即这两束光将独立构成自己的滤光器系统。在下篇文章中将介绍利用这一特性构成的全透射滤光器。

2. 连续视频光谱仪

在引言中提到了视频光谱仪的重要性和迫切性。采用多通道滤光器系统很容易实现它。如我们可以作成 $64 \times 64 = 4096$ 的通道。其第一级的带宽约为 1\AA ,将这些通道连续地排列在 $\lambda 4000 - 7000\text{\AA}$ 的可见光范围上,就可实现连续视频光谱仪。双折射滤光器(特别是宽场的)具有很大的视场,Fabry-Perot系统也无法相比^[12]。加上它的中心波长定位严格,并且长期稳定,如果每级采用调节波长装置将构成极其优良的视频连续光谱仪。

3. 多波段视频光谱仪

对于太阳物理研究来说,常常并不需要作连续的光谱观测,而仅仅需要在指定的Fraunhofer线及其附近作多谱线(多波段)观测,像在传统光栅光谱仪中,常用多波段光谱仪,这是大家十分熟悉的。多通道滤光器的带宽设计若为 0.01\AA ,多通道数仍取4096个,选择10条谱线观测。根据谱线宽度及大体的位移范围,可确定每个波段(各条谱线)需要使用的通道数。如 $H\alpha$ 可能要用256个通道,但 $\lambda 5250$ 磁敏线可能有48个通道就足够了,如图8所示。

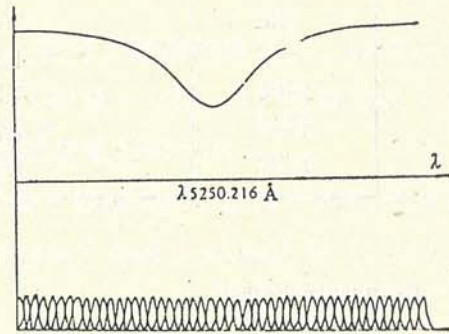


图8. 多波段中一个波段分布图

4. 多通道数与双折射晶体用量的关系

众多的通道会带来令人吃惊数目的窄带滤光器,令人望而生畏。幸运的是,恰恰是多通道滤光器的结构要求回答了这个难题,它要求把厚的晶体排在光路的前部,而把较薄的级排在各分支光路上,如图4和图5所示。这种排列使最厚级为所有通道所公用,因而大大减少了用材所引起的压力。双折射滤光器的最厚级厚度若为 d ,那么整

个滤光器用材为 $2d - \frac{d}{2^{N-1}}$ 。一般考虑N级数较大,大体用材是2d。在一个双通道滤光器中,最厚级用材仍然是d,两个分开的滤光器各自用材大体是2d,所以共用材料3d。一个4通道滤光器,最厚级用材d,两个次厚级用材为 $2 \times \frac{d}{2} = d$,4个次次厚级用材为 $4 \times \frac{d}{4} = d$,其后4个更低的级次用材大体上为 $4 \times \frac{d}{4} = d$,所以4通道用材共计为4d。表1列出了各通道的用材量,不难看出,通道数是以2为乘积的几何级数增加,而用材量是以d增加的算术级数。另外值得强调的是,贵重的难于加工的冰洲石级用材很少,而大部分用材份额为较便宜的容易加工的石英所占据,而且这些石英片在大多数情况下(即采用调节波长装置情况下)完全可以加工成等厚的片子,这样的加工可以成批进行。另一面也应看到,虽然双折射级用料量不多,但组偏器、调节波长装置的用量很大。虽然这些元件并不昂贵,但也的确增加了相当的加工与调试工作量。

表1. 多通道滤光器用材量

通道数	双折射材料用量	与单通道比
1	~2d	1
2	~3d	1.5
4	~4d	2
8	~5d	2.5
16	~6d	3
32	~7d	3.5
64	~8d	4
128	~9d	4.5
256	~10d	5
512	~11d	5.5
1024	~12d	6
2048	~13d	6.5
4096	~14d	7

5. 集成视频光谱仪

双折射滤光器具有视场大的突出优点,多通道滤光器解决了同时获视面光谱的可能性,实体 Michelson 偏振干涉级使滤光器的光谱分辨率有提高到 0.01\AA 的可能性。随着微电子学、固体电光器件的发展,CCD和Reticon,视面多元接收器已较普遍地被应用于天文观测领域。我们可以综合这些技术,设想成一种集成视频多通道光谱仪,以CCD或Reticon器件作为接收器,如 $16 \times 16 = 256$ 通道, $32 \times 32 = 1024$, $64 \times 64 = 4096$ 通道,每一个器件占面积为 $1 \times 1 \text{cm}^2$ 左右。这些器件统一安排在一个致冷器或杜瓦瓶中,用统一的后继处理电路实现数字化,并送入计算机。很可能这意味着出现一代新的光谱仪,它的性能明显优于传统的光栅光谱仪和传统的单通道双折射滤光器。它很可能促进太阳物理,甚至天体物理研究的进一步发展。也许有人会问,这样多的CCD可能吗?只要看看近十年来计算机内存贮器及速度的变化,就应有信心,能实现这一

重要设计,即使在目前作256个CCD,估计值200万美元。这与一些大型天文仪器的价值相比仍然是一个具有实现可能的数目。

至于各通道的差异所引起的光源的同一性问题,只是仪器的系统差,完全可用计算机来做系统校正。

6. 解决强光吸收引起的发热问题

对强光源太阳光的少量吸收,都会使双折射晶体和实体Michelson偏振干涉级升温而引起温度不均匀。在传统Lyot-öhman滤光器中,最温敏的最厚级一般放置在滤光器的中后部。由于多级次的滤光作用,到这些级时,太阳辐射流量已经大大减弱。对这种辐射的少量吸收所引起的升温已到可忽略的程度。视频光谱仪要求将最厚的级置于最前面,这会引发较严重的问题。对冰洲石而言,波带随温度位移约为 $-0.3\text{\AA}/1^\circ\text{C}$,一个 0.1\AA 带宽的滤光器,1/100度的升温都会引起1/30带宽的位移。吸收太阳光引起的升温受光照强度影响,而光照强度又受天气影响、太阳的时角以及天顶角有关,这些因素随时都在变化,因而引起波带位置的漂移。对实体Michelson干涉级来说,情况有些不同,这种级有很强的抗温敏性能^[13],但是特别害怕器件内部的温度不均匀性。强太阳光照射在器件的局部位置上,微小的吸光都会引起温度的不均匀性,它将引起器件通光孔径上长度和折射率的微小变化。这种变化只要超过1/100波长,就将严重影响固体Michelson级的性能,甚至使它失去作用。

当多通道视频光谱仪应用于太阳时,特别是应用于大口径太阳望远镜系统时,应十分注意由吸收引起的升温 and 升温不均匀问题。我们考虑下列措施将有利于改善这个问题的处境。

(1) 减小太阳观测区域为 $4' \times 6'$ 或者 $3' \times 4'$,在滤光器前的焦平面上加光栏来作到这点,这样进入滤光器的光量将相应减少为 $\sim 1/40$ 或 $\sim 1/80$,这种区域的减少与滤光器可达到的通光孔径以及CCD和Reticon目前的容量是相当的。

(2) 根据视频光谱仪的工作波长范围,先设置前置干涉滤光片,去掉不用的光谱范围,如可见光,只要 λ 3800至7000 \AA 区域,则用干涉滤光片去掉 $\lambda < 3800\text{\AA}$ 和 $\lambda > 7000\text{\AA}$ 的光谱。

(3) 根据多波段视频光谱仪所选定的谱线,在滤光器的前面一级或几级设置普通的石英级,先去掉不用的光谱范围,然后再用多通道方案。

(4) 在第一块组偏器的出射两翼上,分别设置分区干涉滤光片,使两束光各自负担所观测的光谱区。如图2中 I_L 透过 λ 5500至7000 \AA 的范围, I_S 透过 λ 3800至5500 \AA 的范围。

(5) 尽量吸收小的玻璃和双折射材料,实体Michelson级两臂上的玻璃吸收情况最好匹配,使在通光面上尽量产生接近的温度分布。

(6) 设置多通道头,先用带宽较宽的石英级隔离所用谱线,而后再研究各谱线光谱,这将在下篇中评述。

我们希望听到广大研究工作者改善吸收发热提出更多更好的建议。

参考文献

- [1] Mein, P., *Solar Phys.*, 54 (1977), 45-51.
- [2] William, D. Heacox, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 95 (1983), 591.
- [3] Beckers, J. M., *Appl. Opt.*, 14 (1975), 2061.
- [4] Ai Guoxiang and Hu Yuefeng, *Multichannel Birefringent Filter*, A report in MSFC Workshop on Solar Vector Magnetic Fields, in May, 1984.
- [5] Banning, B., *J. Opt. Soc. Amer.*, 37 (1974), 729.
- [6] Tarner, A. F. and Baumeister, P. W., *Appl. Opt.*, 5 (1966), 69.
- [7] Vere, J. T., *Opt. Acta.*, 11 (1964), 315
- [8] Chapman, P. B., Downs, M. J. and King, R. T., *Appl. Opt.*, 8 (1969), 1965.
- [9] Lyot, B., *Ann. Astrophys.*, 7 (1944), 31.
- [10] Evns, J. W., *J. Opt. Soc. Amer.*, 39 (1949), 229.
- [11] Title, A. M. and Ramsey, H. E., *Appl. Opt.*, 19 (1980), 2046.
- [12] Title, A. M., *Research on Spectroscopic Imaging, Vol.1*, in LMSC -D674593, April, 1979.

摘要
相
光
这
即
滤
—
定
Pe
如
50%
滤
Pe
60-
领
物
带
双
通
方
—
滤
达
具