

多通道双折射滤光器

—III. 多通道头及多通道望远镜

艾国祥 胡岳风

中国科学院北京天文台

摘要

本文讨论多通道滤光器的第三种型式——带多通道头的滤光器。在多通道头中设置较初级的滤光器级次,分出各所需要的通道,使指定的工作谱线分别通过各通道,然后分别在各个通道之后配置高级次的滤光级,构成整个多通道滤光器。这一结构:1)不需要将最热敏的最厚级置于滤光器最前部,避免了温敏引起的波带位置不稳定;2)各通道可根据工作需要各自选择带宽;3)有利于在其后配置众多的Fabry-Perot和Daystar等各种单通道滤光器;4)可将天文台中现存的所有滤光器经过多通道头组合在一起,在一个镜筒中实现同时的多通道观测。

本文还讨论了与多通道滤光器相配合的多通道太阳望远镜的一些结构特点和设计方法。

一、前言

多通道滤光器从功能和类型来说可分三类:第一类是视频光谱仪^[1];第二类是全透射双折射滤光器^[2];本文主要叙述第三类——带多通道头的滤光器的结构特点和设计方法。根据它的特点,提出了它的一些有重要价值的应用。

与多通道滤光器相匹配的太阳望远镜,产生了一些新的特点,与此相应,在多通道太阳望远镜的设计上提出了一些见解。

二、多通道头

太阳物理的研究有时并不需要把整个可见光谱区全部记录下来,而仅仅需要了解几条或十余条谱线。多波段视频光谱仪是可服务于这种分立谱线的研究的。这里讨论的多通道头也是服务于这一目的的,但这种系统的结构不同,因此具有不同的特性和使用价值。下面介绍多通道头。图1是一个四通道头的结构。多通道头中的第一块组偏镜BP₁^[1]将入射光分为彼此垂直的线偏振光,它起偏振镜作用,这两束光可以各自组成光谱上彼此独立的多通道系统。图1中只画了与入射光平行的光束,由它分成四通道的结构。b₁是双折射晶体,在多通道头中,通常为石英,其干涉级数较低,一般为几十级至百余级,因而对温度引起的波带相对位移较不敏感。由BP₂分出光谱上互补的两光束,平行束经b₂和BP₃,再分出两光束I和II;垂直束经b₂'和P再形成一级简单级,其后续经b₃和BP₄再分出两光束III和IV,总共构成分立的四个通道,可以分配于所需的四个波长上工作。多通道头与多波段视频光谱仪同属多通道双折射滤光器,但在结构上是不同的。多波段视频光谱仪中,最厚级是所有通道共用的,在最前部,

其后各级依次减薄。而多通道头中，第一级是较薄的级次，其后的级次较自由灵活，在多通道头之后的各个通道中的级次更可以自由地处理。

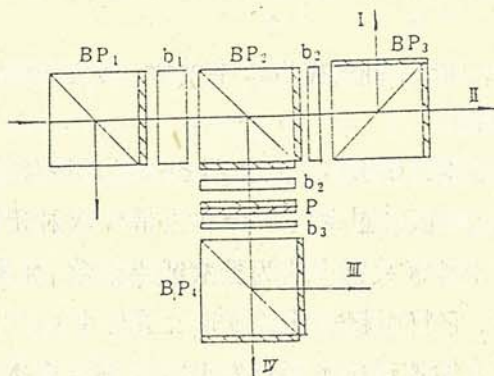


图1. 四通道头示意图

下面介绍一个四通道头的具体例子，选择的太阳谱线波长为 $\lambda 6563\text{\AA}$ ， $\lambda 6302\text{\AA}$ ， $\lambda 6102\text{\AA}$ 和 $\lambda 5889\text{\AA}$ 。当工作温度 45°C 时，由澳大利亚和美国提供的双折射率数据^[3, 4] 计算得到，当对 $\lambda 6563\text{\AA}$ 的干涉级数为 80.5 时， $\lambda 6302$ ， $\lambda 6102$ ， $\lambda 5889$ 分别为 84，87 和 90.5。以此确定图 1 中 b_1 的厚度。经 BP_2 干涉级数为整数的波长 $\lambda 6302$ 和 $\lambda 6102$ 沿平行方向出射，干涉级数为半整数的波长， $\lambda 6563$ 和 $\lambda 5889$ 沿垂直方向出射。在平行方向之后，再设置 b_1 ，其厚度为 $b_1/1$ ，对 $\lambda 6302$ 的干涉级数为 42，对 $\lambda 6102$ 的干涉级数为 43.5，所以经 BP_3 ，平行方向出射的是 $\lambda 6302$ ，垂直方向出射的是 $\lambda 6102$ 。在组偏镜 BP_2 的垂直方向，置 b_2' ，其厚度为 $b_1/2$ 减掉 $\lambda/4$ 的厚度（可以通过调节波长装置实现），这时 $\lambda 6563$ 和 $\lambda 5889$ 的干涉级数分别为 40 和 45，它都在平行光束中通过，所以在它后面仅需放置一片平行方向的偏振片 P 即可。在 P 之后再置 b_3 ，其厚度大体上为 $b_2'/2$ ，它对 $\lambda 6563$ 和 $\lambda 5889$ 的干涉级数分别为 20 和 22.5，其后置组偏镜 BP_4 ， $\lambda 6563$ 沿平行出射， $\lambda 5889$ 沿垂直出射。在图 1 中 $\lambda 6302$ 沿 I 出射， $\lambda 6102$ 、 $\lambda 6563$ 和 $\lambda 5889$ 分别沿 II、III、IV 出射。在这四束光被分开之后，不难匹配级次较高的双折射滤光器。

在定性地讨论多通道头之后，下面讨论如何定量确定多通道头中各级晶体厚度的方法。这里首先应说明的两点是：第一块组偏镜所分开的两束光，在光谱关系上是彼此独立的，所以每一束光中的通道可以独立设计。另外为了紧凑和对称，应尽可能使每一束光中的通道数相等，每一个通道所经历的组偏镜相等，要满足这些条件，每束光中通道数宜用偶数，对整个滤光器来说宜用 4 的倍数。

下面讨论第一组偏镜中的一束光中的通道设计。设所需波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_i$ ， i 为通道数，如上所述， i 最好为偶数。这些波长对应的双折射率为 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_i$ ，对厚度 $d_{i,L}$ 的双折射晶体，干涉级数为：

$$N_{K,L} = \frac{\mu K d_{i,L}}{\lambda_K}, K=1, 2, \dots, i \quad (1)$$

在 i 个波长中，任选一个波长，为方便，选 λ_1 。当 $d_{i,L}$ 对 λ_1 产生的干涉级数 $N_{1,L}$ 为 $1, 1\frac{1}{2}, 2, 2\frac{1}{2}, \dots, \frac{L}{2}$ 时，由下式计算其他波长上的干涉级数。

$$N_{K,L} = \frac{\mu K \cdot d_{I,L}}{\lambda_K} = \frac{\mu K}{\lambda_K} \cdot \frac{N_{I,L} \lambda_1}{\mu_1} \quad (2)$$

当 $N_{K,L}$ 在某些 L 值时,都是整数或半整数,其允许误差 ± 0.05 ,将这时的 $d_{I,L}$ 值,作为第一级晶体的厚度。

从原则上讲,对主透过带波长,滤光器各级晶体厚度应设计得具有整数或半整数干涉级数,否则将引起峰值透过率的下降和主带外散射光的增加。在多通道头中,要使各通道所有波长上干涉级数都严格为整数或半整数,那是十分困难的。所以我们确定允许 ± 0.05 的误差,它将引起主透过波长上透过率从1下降为 $\cos^2(\pm 9^\circ) = 0.976$,我们认为这一最大允许的透过率下降仅2.4%,这对大多数太阳研究目的来说,是可以容忍的。在多通道头中,其后的次级,由于其厚度只有第一级的1/2,1/4,1/8左右,即干涉级数只有第一级的1/2,1/4,1/8等。如第一级干涉级数为39.05和45.95,则它们的一半是19.525和22.975,与半整数或整数之差,减为0.025,即比第一级的误差减少了一半,再往后面的级,误差更将减少。关于散射光,主要是各级之间匹配的严格与否引起的。在双折射晶体加工中,一般允许1/50—1/100波长厚度的误差。在多通道头中,即使第一级误差高 $0.05 = 1/20$ 波长,第二级最多达 $0.025 = 1/40$ 波长,所以两级间匹配至少相差1/40波长,已非常接近加工误差的大小,其后的匹配误差,还会以 $\pm 0.05/2N, N=1,2,3,\dots$ 减少。所以不会产生明显的散射光。在多通道头之后,各个波长已经分置于各单通道之中,在匹配比多通道头中第一级更厚的级次时,可以设计为逐步地把允许误差,按 $\pm 0.05/2M$ 减少,其中 M 是比多通道头中第一级更厚的级次数。

有时会出现这种情况,在某一组偏镜出射的波长全部是整数或半整数,这时组偏镜的使用就失去意义,可以用一般偏振片所代替,如图1中从第二组偏镜垂直出射光束的情况。

这里需要讲明的一点是, $N_{K,L}$ 在某个 L 值时,全部 $N_{K,L}$ 为整数或半整数(在允许误差之内)的情况是比较多的,这里存在着对 L 值的最佳选择方案。我们建议根据下列四点作选择。1)应考虑可用优质干涉滤光片的带宽和透过率选择 L 值。干涉滤光片一般用来作各主带之间的隔离滤光片;2)选择更为靠近整数或半整数的组合(误差的控制);3)考虑整个滤光器的对称和紧凑要求;4)多通道头在望远镜中的尺寸匹配。

在结束本节之前,让我们小结一下多波段视频光谱仪与带多通道头的滤光器的同异点。两种类型都可用于多条分立的光谱线研究,对不同谱线都可作谱线附近光谱的多通道研究。不同点在于:①在多波段视频光谱仪中,整个滤光器中的最厚级必须置于最前部,而带多通道头的滤光器中,最厚和次厚的一些级次可以放在滤光器中部或后部,所以带多通道头的滤光器抗太阳辐射致热的能力较强;②多波段光谱仪中各通道带宽基本上相同,而带多通道头的滤光器各通道带宽可不相同,也可以相同;③多波段光谱仪能大幅度节省较厚级次的冰洲石原材料,而多通道头滤光器原则上很难节省较厚级次的冰洲石原材料。

三、多通道头的应用

基于上节中讨论的带多通道头的滤光器的一些特点,构成了多通道头的一些有价值的特殊应用。

1. 多通道头避开了把最厚的晶体级置于滤光器最前部的结构,因而避开了热敏引起的滤光器波带位置不稳定问题。在多通道头之后,如有需要,仍然可以在由多通道头分离的各光束中,设置一条谱线的视频光谱仪,而起到研究该谱线视面光谱的作用。但这样所用原材料耗费较大。

2. 多通道头之后设置的滤光器带宽可以自由选择,有利于根据谱线的特性及研究工作的需要选择带宽,以及充分利用光量以提高信噪比。

3. 利用多通道头,在各通道之后配置相应的Fabry-Perot与Daystar滤光器,可以较容易地实现多波段的单色光观测,如多波段的耀斑单色像观测,或白光耀斑多窄波段观测。这些波段观测在相同大气和望远镜至光路中同时进行,有关细节可有很好地对应,可以获得很高的时间分辨率。

4. 白光耀斑的巡视与观测,要求在较宽带宽的几个连续谱上进行观测,带宽一般为 $20-50\text{\AA}$,完全可用多通道头满足其同时观测要求。

5. 把已经有的滤光器组成多通道滤光器。在不少天文台只有一个圆顶和一架望远镜,但有众多的滤光器,这些滤光器不能同时观测,更换很麻烦。另一些天文台有几架望远镜,配置有几个滤光器。望远镜的质量有好有坏,而且观测时还要几个人同时监视。对上述两种情况都可以通过在最佳望远镜上设置多通道头,把所有滤光器组织在一起,以一、二个人进行同时观测。这是一种多快好省的方法,而改装多通道头只花很少经费和人力。

四、多通道望远镜结构特点

用多通道望远镜可以使一个望远镜起到多个望远镜的作用,而且由于各通道是在完全相同的大气条件和完全相同的主光路中同时观测,这非常有利于研究各种太阳现象以及细节的相互关系。这种紧凑而高效能的望远镜若能放入太空,可能发挥出更大的威力。由于使用多通道滤光器,望远镜结构上作了一些新的考虑,现介绍如下:

双折射滤光器在太阳望远镜中的使用有两种状态。一是在准直光中使用,这多为专门配置滤光器的望远镜所采用,如 $H\alpha$ 色球望远镜。另一是在会聚光中使用,一般放在主焦面之前。这种情况下,往往望远镜仅把滤光器作为终端附件之一而使用。图2示出了这两种状态的结构。

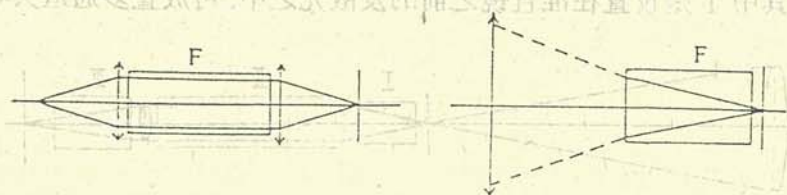


图2. 滤光器在平行光与会聚光中的使用结构

在双折射滤光器中,最贵重和难找的高质量材料莫过于冰洲石。与望远镜匹配的滤光器的通光孔径涉及到冰洲石的用量,因此在滤光器与望远镜的匹配考虑中,首推滤光器孔径的选择。

1. 在平行光中,滤光器极小孔径的计算。当物镜直径为 D ,准直镜角放大率为 M ,观测太阳视面区域的视场角为 θ' 时,滤光器光程总长为 $L=n \cdot l+l'$,其中 n 为滤光器材料的平均折射率, l 为材料长, l' 为空间剩余长度。滤光器通光孔径由两部分组成,第一部分是物镜在平行光中的成像的大小,通过场镜可以把物镜像成在滤光器中部。物镜像的大小为 $d=D/M$ 。第二部分是由视场角 θ' 在平行光中引起的光束倾斜导致的光束倾斜导致的孔径增加 $d'=M \cdot L \cdot \theta'/3437.75$ 。两部分相加构成通光孔径

$$\Phi = d + d' \quad (3)$$

由 Φ 对 M 求极值, $\Phi / M = 0$, 可得 $d = d'$, 带入(3)得到

$$\Phi_{\min} = 2d = 2d' \quad (4)$$

(4)表明当物镜像大小与视场倾斜大小相当时,有极小通光孔径。

2. 会聚光中,极小通光孔径的计算。 D 为物镜大小, f 为焦比, $f = F/D$,太阳像视场角 θ' 。滤光器通光孔径也由两部分组成。第一部分太阳的观测视场区在焦平面上的大小为 d 。 $d = D \cdot f \cdot 0.009 \cdot \theta'/31'$ 。另一部分是在滤光器前部,由于会聚光增加的孔径 $d' = L/f$,其中 L 也是滤光器光程总长度。两项相加,通光孔径为

$$\Phi = D \cdot f \cdot \theta' \cdot 0.00029 + L/f \quad (5)$$

Φ 对 f 取极值, $\Phi / f = 0$, 可得 $d = d'$, 即

$$\Phi_{\min} = 2d = 2d' \quad (6)$$

(6)式表明,当这两部分孔径相等时,有极小值条件。

由于滤光器中存在离轴光线引起的透过带位移,放大倍数 M 过大和焦比 f 过小会引起不容忽略的透过带位移,因此这些因素在望远镜与滤光器的匹配设计中均应综合考虑。上面两段仅考虑了 M 和 f 对 Φ 的影响,只提供了局部考虑的数字根据。

3. 多通道滤光器在望远镜中的设置结构。

在多通道滤光器中,由于使用较多的组偏镜,在整个滤光器中,组偏镜只比通道数少1^[1];使用全反射棱镜以使滤光器对称和紧凑;为了达到很高的光谱分辨率,如 0.01\AA ;使用实体Michelson干涉级,以及广泛使用调节波长装置和全色波片等,这些都是具有相当长度的部件,所以物镜也希望较大。这些因素都会增加滤光器的通光孔径,使滤光器变得昂贵。为了克服这些困难,在滤光器与望远镜的配合上,我们采用图3的结构。其中I是设置在准直镜之前的发散光之中,可放置多通道头等。为简便,

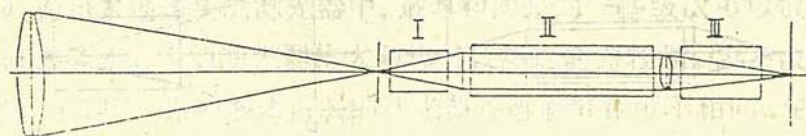


图3. 综合平行光与会聚光方案的滤光器装配结构

图3中只画了一个通道。II是滤光器主体,放在平行光之中。III是滤光器的尾部,这个位置是处于焦平面之前的会聚光之中。我们安排的这种结构,即把滤光器分三段单独放置,我们考虑这有如下主要好处:①便于影响滤光器通光孔径的滤光器的有效长度,减少到大约原来一体设计时长度的三分之一左右,这样通光孔径就可明显减少,容易取得合适的冰洲石,以制造具有高光谱分辨率的滤光器,并节省经费;②可以明显减少望远镜筒的长度;③可以把一些实验性的设计单独放置,可以随时加进去或者撤出来;④把一些对热敏感的高级次级放在后部,增加波带的稳定性等。当然这种分段设计和放置也会带来一些其他问题,如恒温器就要作三个等,但这些问题带来的问题不大,也不难解决。

参考文献

- [1] 艾国祥, 胡岳风, 中国科学(A辑), 8 (1986).
- [2] 艾国祥, 胡岳风, 中国科学(A辑), 9 (1986).
- [3] Smarrtt, R. N. and Steel, W. H., J. Opt. Soc. Amer., 49 (1959), 710.
- [4] Billings, B. H., in American Institute of Physics Handbook, third edition (1972), 6.