

多通道双折射滤光器

——II. 全透射滤光器

艾国祥 胡岳风

中国科学院北京天文台

摘要

利用多通道折射滤光器的原理,在由偏振光束分离器分开的两束光中,采用完全相同的单通道滤光器,再经最后检偏器将两束已经滤光的光汇合,而获得了全透射滤光器。这一设计上的改进,去掉了传统双折射滤光器一开始就去掉一半光能的缺点,这对恒星和星系单色观测至关重要。本文专门建议了一个在一个CCD接收器情况下,即可起全透射滤光器作用,又可由两通道获得不同波长两个单色星像的方法。

同样利用四通道、八通道……等,可以设计双通道和四通道……等全透射双折射滤光器。

一、前言

双折射滤光器作为视面单色器,具有很多的优点,视场大、带宽窄、透带位置稳定、调节方便、成像质量高等。由于双折射滤光器采用偏振光的干涉原理,与Fabry-Perot的膜层干涉不同,它只有在偏振光情况下才能工作,所以必须采用起偏振器,如人造偏振片等,一开始它就把自然光去掉了一半,这样使它的透过率一下子去掉了50%。虽然在窄带情况下它的透过率与Fabry-Perot相当(如 0.5\AA 作 $H\alpha$ 巡视的Daystar滤光器的透过率约为10%)。但带宽较宽时,如几十 \AA ,它的透过率明显不如Fabry-Perot或干涉滤光片(如 20\AA ,双折射滤光器仅能达到25-30%左右,而干涉滤光片可达60-70%)。在太阳单色光观测中,双折射滤光器一直处于领先地位,但在恒星和星系领域里几乎无人问津,我们想这与恒星观测领域惜光如命有关。从事恒星观测的天体物理学家,不愿意一下子就去掉50%的光,他们希望能获得 $\lambda 4000-7000\text{\AA}$ 连续可调,带宽约为 20\AA 的滤光器,透过率越高越好,争取达到60%左右。这样高的透过率在传统双折射滤光器中是完全不可能的,即使没有任何吸收,透过率也只能达到50%。在多通道滤光器发明之后,我们采用多通道原理^[1],提出了全透射滤光器的方案,这个方案有可能达到60%左右的透过率,至少比最高透过率的双折射滤光器高出一倍。有一点说明,这里称呼的“全透射”的意义,限定在两方面,第一,它与传统的双折射滤光器一下子去掉50%的光相比,它是利用全部自然光;第二,当忽略吸收时,它可达到全透射。

本文继第一篇之后,主要讨论全透射滤光器的工作原理,它的各种型式以及一项具体应用建议。

二、全透射滤光器原理

在第一篇文章第三节第一段中指出,在多通道滤光器中,同样的组偏器放在不同位置作用稍有不同。放在第一片位置上的起偏器作用,将自然光分为两束互相垂直的偏振光。而后面的组偏器,不仅分出两束互相垂直的偏振光,而且这两束光的光谱也是互补的,是互相有关的。我们采用如图1的结构,由两通道滤光器组成全透射滤光器。 BP_1 和 BP_2 是组偏器, $b_1 \sim b_6$ 是双折射晶体,晶轴成 45° , P 为一般偏振片,AR是全反射棱镜,这是一个双通道系统。在两个独立的滤光器中,所有元器件都是相同的。在起偏器 BP_1 中,互相垂直振动的线偏振光,在最后的检偏器 BP_2 中又汇合而成为一束自然光,这个系统在光路上是完全对称的。把滤光器的方向倒转 180° ,仍是同一个滤光器。我们这样排列,主要是使原理的说明变得清晰。这样排列,在弱光中吸收光所引起的发热是十分微小的,所以可以采用上面的对称排列方法。另外各晶体, b_1 与 b_1' …… b_6 与 b_6' 都是严格相同的,加工也较方便。事实上,从理论上和实际上都不要求作对称排列,除了尺寸配合,需要 b_1 和 b_1' 放在原位置之外,其他各级完全可以平行地排列在两个平行的通道里,如图2所示。也可以随意作出各种认为有必要的排列。平行排列的两个好处是:1. 如果采用调节波长装置,两束光可以只用一套转动输出件,而省去一套。2. 在强光照射下,两束光中各对应级次受热情况较为接近,各级在恒温槽中的情况和位置也较为接近。

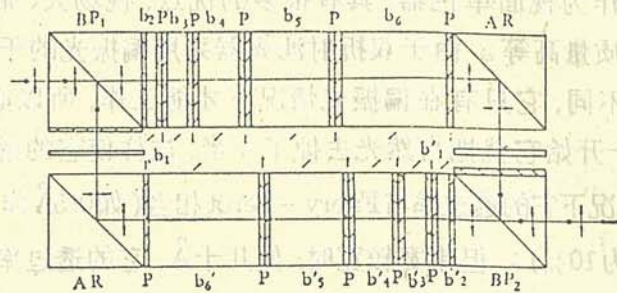


图1. 全透射滤光器原理图

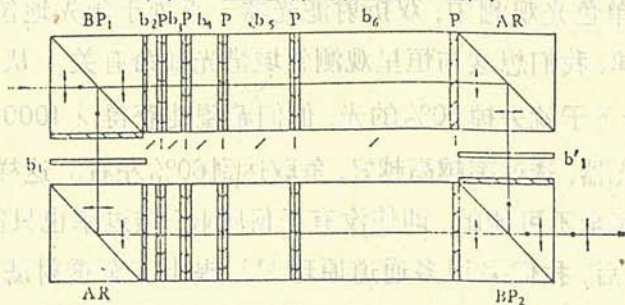


图2. 各级平行排列方式

三、多通道全透射滤光器

在上节已叙述了由两个完全相同的滤光器构成全透射滤光器的情况,上节的全透射滤光器只适应于产生一个单色像,属于全透射单通道滤光器。下面讨论全透射多通道滤光器。以两通道为例。图3示出了它的结构图。在上层平面图中 BP_2 和 BP_2' 都是向

下反射的组偏器,除了增加这两块组偏器,其他光路都与图2的单通道全透射滤光器相同。由BP₃出射的I₁,是第一个全透射滤光器通道的光。在下层的平面图中,AR₁和AR'₁'全反射棱镜将BP₂和BP₂'向下反射的光引向第二平面,即下层平面,在下层平面上的光路与上层平面基本相同,最后经BP₄出射的I₂光,是另一通道的全透射滤光器的出射光。从上面的简单结构不难看出,可以形成任一通道的全透射滤光器,不过将更多地使用组偏器和全反射棱镜。具体设计时要小心仔细地排列,以得到紧凑的滤光器。

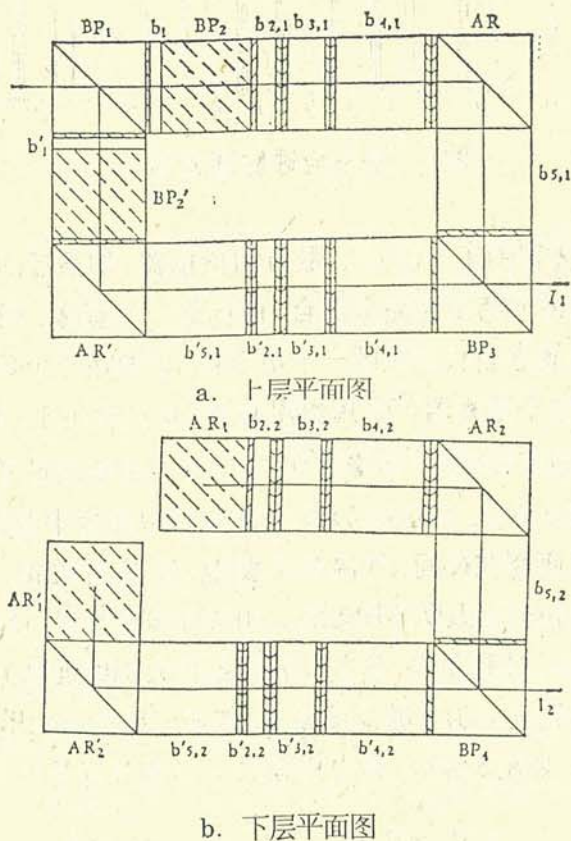


图3. 双通道全透射滤光器示意图

四、星系全透射滤光器

这里构思了一个星系全透射滤光器。恒星和星系观测借光如命,采用全透射系统是理所当然的。全透射滤光器的发明,增强了双折射滤光器同Fabry-Perot滤光器的竞争力量。

这个滤光器的要求是:带宽 20\AA 左右(在 5500\AA 时),从 $\lambda 4000-7000\text{\AA}$ 连续可调,中心波长定准精度 0.1\AA 左右,透过率要求达到60%左右。希望滤光器有两种工作状态,一是全透射只在一个波长上工作;二是全透射的两个通道具有单独的调波长装置,各自通过不同波长,然后在最后的起检偏器作用的组偏器中,两束光汇合。但离开一个很小的角度,此角要稍稍大于星像的大小,这样可以采用CCD接收器来获得一个星象的两波段测光,从而很容易确定星系电离状态等物理参数。图4是根据这些要求而作的一个初步设计。这个全透射滤光器由两个完全相同的通道组成,但每一个通道可以独立地确定自己的工作波长,各自的干涉滤光片I和I'可能作适当的转动而改变自己

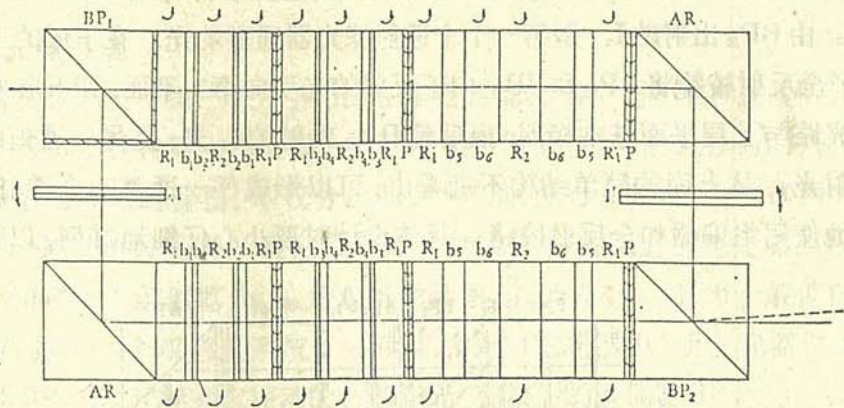


图4. 星系全透射滤光器

的中心波长,以适过滤光器的工作波长。最后的检偏器,即最后的组偏器BP₂可作微小的转动,或者使两通道的两束光完全重合,而构成一个星象,或稍作转动产生两个不重合的星像。每个星像各自代表星的一个单色像,以便在一个CCD接收器中能获得一个星的两个单色像,整个滤光器不采用恒温装置,这主要由于:1)滤光器带宽较宽,约20Å左右,而石英级温度每增加一度紫移0.7Å。中心波带位置可以作系统温差改正,若观测室温度记录误差0.5℃,只起0.7×0.5/20=1/60波带半宽的移动,这对星系单色像影响甚微;2)星系研究在夜间,气温变化缓慢;3)星光微弱,不会由于少量的光吸收引起晶体明显升温而引起温度不均匀性。由于无恒温装置,该滤光器长约160mm,宽约100mm,高约50mm,体积不大,易于安装在各种大型望远镜上使用。这个滤光器每个通道由六级简单级组成。为了减少偏振片,作成三级Evans^[2]级。每级Evans级都是可以调节波长的。如图5所示,其中所有的λ/2波片都是可旋转的,用于调节中

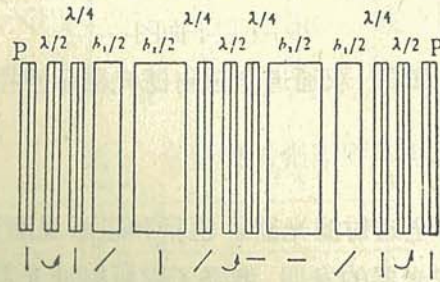


图5. 可调波长Evans级

心波长。偏振片P可由组偏器代替。作成Evans级可省三片偏振片,使透过率明显提高。在本系统中只用两块组偏器,两块偏振片。组偏器透过0.93,偏振片透过0.89,则偏振器件的透过率可达0.68,加上干涉滤光片吸收和玻璃及材料吸收约占12%左右,估计透过率为0.60左右。在Evans级中最厚的石英级,在λ5500Å时,带宽约20Å,干涉级数约250级,由滤光器带宽公式^[2]

$$\Delta \lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2}{\mu d} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \cdot \frac{\mu}{\lambda} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

$\mu(\lambda 5500) = 0.00917, (\frac{\lambda}{\mu} \cdot \frac{\mu}{\lambda} - 1)^{-1} \approx 0.911$, 当 $\Delta\lambda = 20\text{\AA}$ 时, $d = 15\text{mm}$ 。最薄的石英级厚度 $d = 15\text{mm}/2^5 = 0.47\text{mm}$, 其带半宽 $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_e \times 2 = 640\text{\AA}$, 全宽达 1280\AA , 所以干涉滤光片的半宽可以做得宽达 1280\AA , 这样宽的干涉滤光片只要稍作转动, 就可工作在 $\lambda 4000 - 7000\text{\AA}$ 的波长上, 并保持很高的透过率, 根据 Lyot I 型宽视场级公式 [2]

$$n = n_o(1 + \frac{\psi^2}{4\omega} (\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\omega})),$$

$$n - n_o = n_o \frac{\psi^2}{4\omega} (\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\omega}) = n_o \frac{\psi^2 \mu}{4\omega^2 \varepsilon} \quad (2)$$

这里 n_o 是中心光线干涉级数, 对本滤光器 $n = 250$, n 是光线偏离中心光线 ψ 角 (弧度) 时的干涉级数。对于石英 $\omega = 1.546$, $\varepsilon = 1.555$ 。在双折射滤光器中, 一般定义当 $n - n_o = \Delta n = 0.1$ 时的 ψ 角为半视场, 由上述数据算得

$$2\psi = 2 \times 3437.75 \sqrt{\frac{4 \cdot (1.546)^2 \cdot 1.555 \cdot 0.1}{250 \cdot 0.00917}}$$

$$= 6875.5 \cdot \sqrt{0.648449}$$

$$= 5536.59 = 92.^\circ 3$$

这样算出的视场非常大, 由于在 (2) 式中忽略了 ψ 的四次项, 所以对大角度所算出的视场是夸大了的。从最保守的估计来看, 用到 9° 左右的角视场是没有任何问题的, 因此把这种滤光器使用在焦比 7:1 的望远镜中是完全没有问题的。

在本工作中, 对于陈建生与邹振隆同志的有关建议和讨论特致谢意。

参考文献

- [1] 艾国祥, 胡岳风, 中国科学 A 辑, 1986, 8: 889-896.
- [2] Evans, J. W., J. Opt., Soc., Amer., 39 (1949), 229.