

分裂级滤光器的亮度分布不均匀性

邓元勇 艾国祥 王敬山

中国科学院北京天文台, 100080

关键词:

分裂级滤光器——离轴效应——亮度不均匀性

摘要

本文讨论分裂级滤光器的亮度分布不均匀性。这种不均匀性是由于双折射晶体的离轴效应引起的,特别是当视场较大时,它会严重影响天文观测。例如,在一个最大视场角约为70'的全日面太阳望远镜中,亮度涨落可高达9.44%。

一、引言

四十年代末, J. Evans提出了一种与Lyot滤光器不同的称之为分裂级滤光器的新的双折射滤光器的设计方案^[1]。在这种设计中,一个单级的分裂级滤光器等效于两级Lyot级,但却少用一片偏振片。由于在双折射滤光器中偏振片的透过率较其它光学元件的透过率都低,因此这种改进是很有实际意义的。

另一方面,这种设计也存在一些不利之处。例如,其中最严重的一种就是由于离轴效应而引起的亮度不均匀性。最初,Evans认为一个分裂级滤光器单元等效于如此一个Lyot级滤光器,它的较薄的一级是简单级,而较厚的一级是宽场级,也就是说它具有宽视场特性。事实上,这一观点是不恰当的,而Evans本人随后也发现了这一误解^[2]。Title和Rosenberg于1979年给出了有关视场效应的详尽知识^[3]。但是,他们中没有任何人对如下问题作过详细的讨论:离轴效应是怎样影响分裂级滤光器的积分透过率的?这种影响对天文观测的影响有多严重?

在本文中我们可以看到,由于分裂级滤光器的积分透过率不守恒,因此它的亮度分布是不均匀的。当视场较大时这种不均匀性尤其严重。例如,在北京天文台怀柔太阳观测站使用的全日面太阳磁场望远镜中,亮度差别最大可达9.44%。

二、分裂级滤光器的亮度分布不均匀性

2.1 分裂级滤光器的结构

分裂级滤光器的基本结构示于图1a中。它是由具有元件m和q的分裂级和夹于m、q之间的简单级p组成的。这里,我们将m和q称为分裂级,而将p称为中间级。 n_m 、 n_q 和 n_p 分别表示它们的延迟量, P_1 和 P_2 是偏振片。该单元的透过率为:

$$\tau = \sin^2 \pi (n_m - n_q) + \sin 2\pi n_m \sin 2\pi n_q \sin^2 \pi n_p \quad (1)$$

分裂级滤光器的设计要求:

$$n_j = 2n_m = 2n_a = 2^{j-1}n + 1/2 \quad (2)$$

$$n_p = 2^{k-1}n + 1/2 \quad (3)$$

此处, n 是一个整数, j 和 k 则分别对应于分裂级和中间级在滤光器中所处在级次。在这种情况下, (1) 式可变为:

$$\tau = \sin^2 \pi n_j \sin^2 \pi n_p \quad (4)$$

可见一个分裂级单元是与图 1b 所示的两级 Lyot 级等效的。

2.2 分裂级滤光器中的离轴效应

遗憾的是, 由于离轴效应和加工带来的误差, 实际上很难保证 (4) 式严格成立。我们发现, 在分裂级滤光器中, 这些误差产生的后果较在 Lyot 滤光器中产生的后果严重得多。本文仅讨论分裂级滤光器中离轴效应的后果。为了简化讨论, 我们假设滤光器仅由一个分裂级单元组成, 且其中间级是宽场级, 并且

$$n_j = n + 1/2 \quad (5)$$

$$n_p = 2n + 1/2 \quad (6)$$

如果入射光以相对于仪器轴的角度 (ψ, θ) 透过该滤光器, 那么:

$$n_m = \frac{n_j}{2} \left[1 + \psi^2 k \left(\frac{\cos^2 \theta}{\gamma} - \frac{\sin^2 \theta}{\alpha} \right) \right] \quad (7)$$

$$n_a = \frac{n_j}{2} \left[1 + \psi^2 k \left(\frac{\sin^2 \theta}{\gamma} - \frac{\cos^2 \theta}{\alpha} \right) \right] \quad (8)$$

$$k = \frac{\alpha \gamma - \beta^2}{2(\gamma - \alpha) \beta^2} \quad (9)$$

此处 n_j 是当 $\psi = 0$ 时分裂级的延迟量, α, β 和 γ 表征构成滤光器的晶体的双折射性质。式 (7) 和 (8) 可推出:

$$n_m + n_a = n_j \left[1 + \frac{\psi^2 k}{2} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\alpha} \right) \right] \quad (10)$$

$$n_m - n_a = \frac{n_j}{2} \psi^2 k \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\alpha} \right) \cos 2\theta \quad (11)$$

(10) 式等价于一个简单的宽视场 Lyot 级, 因此

$$n_m + n_a \approx n_j \quad (12)$$

在我们的讨论中还假设滤光器由水晶组成。对于水晶:

$$k = \frac{1}{2\alpha} \quad (13)$$

$$\mu = \gamma - \alpha \ll 1 \quad (14)$$

由于 α 和 γ 都大于 1, 所以可得:

$$1/\alpha \approx 1/\gamma \quad (15)$$

因此由 (11) 式可得:

$$\delta = n_m - n_a = n_j \psi^2 \frac{\cos 2\theta}{2\gamma^2} \quad (16)$$

2.3 积分透过率性质

将(5)、(6)和(12)式代入(1)式,可得:

$$\tau = \sin^2 2\pi n \sin^2 \pi \delta + \cos^2 2\pi n \cos^2 \pi n \quad (17)$$

从而,积分透过率为:

$$T = \int_{n_o-1/2}^{n_o+1/2} \tau dn = 1/4 + \sin^2 \pi \delta / 2 \quad (18)$$

此处, n_o 是分裂级的设计延迟量。值得注意的是,在(18)式中我们忽略了 δ 随波长的变化。这一假设的合理性在于:一方面, δ 是一个非常小的量,例如,对于一个以水晶制成的,设计延迟量为800的分裂级而言,当它以方向 $(60', 0)$ 入射时, δ 仅约为0.0152;另一方面, n 的变化在滤光器的一个积分周期中仅为 $\pm 1/1600$ 。因此, δ 的变化是极小的,可以不予考虑。这一假设也被表1所给的定量计算所证明。

从18式可知:分裂级滤光器的积分透过率在其视场中是不守恒的。当 ψ 不变时,亮度依赖于 θ 呈周期性变化。

$$T_{\min} = 0.25 \quad \text{当 } \theta = k\pi/2 + \pi/4 \text{ 时,} \quad (19)$$

$$T_{\max} = 0.25 + \sin^2 \pi \delta / 2 \quad \text{当 } \theta = k\pi/2 \text{ 时,} \quad (20)$$

式中 δ 由(16)式定义。当 θ 不变时,亮度分布则呈临边增亮:

$$T_{\min} = 0.25 \quad \text{当 } \psi = 0 \text{ 时,} \quad (21)$$

$$T_{\max} = 0.25 + \sin \pi \delta / 2 \quad \text{当 } \psi \text{ 最大时,} \quad (22)$$

所有这些现象都可从图2中显示出来。

最后,为了比较,我们简单讨论 Lyot 滤光器的积分透过率。我们假设该 Lyot 滤光器与上面讨论的分裂级滤光器等效。考虑离轴效应,较薄一级的延迟量为:

$$n_j = n(1 + \psi^2 \frac{\cos^2 \theta}{2r^2}) = n + \delta \quad (23)$$

其积分透过率为:

$$T = \int_{n_o-1/2}^{n_o+1/2} \cos^2 \pi (n + \delta) \cos^2 2\pi n dn = 0.25 \quad (24)$$

因此, Lyot 滤光器的积分透过率是守恒的,视场中不会出现亮度不均匀性。

2.4 定量计算

在北京天文台怀柔太阳观测站的10cm全日面太阳磁场望远镜中使用了一个分裂级结构。它由水晶制成,其分裂级和中间级的延迟分别为800和1600。图2显示了它的亮度形态。表2是当 $\theta = k\pi/2$ 而 ψ 从 $0-100'$ 时的定量计算结果。在该表中,Column 1 由(18)式算得,而 Column 2 由(17)式直接积分得到。两组数据间的差别是很小的,因此(18)式的假设是成立的。

2.5 亮度不均匀分布对天文观测的影响

分裂级滤光器的亮度不均匀分布的事实促使我们对它的性质进行详细的研究。在我们的10cm太阳磁场望远镜中,最大视角约为 $70'$,于是从表1中可以发现亮度涨落达到9.44%。这种不均匀非常大,足以歪曲被观测目标的真实形态,影响磁场测量的准确性,以及增加散射光等等。因此,当我们使用分裂级滤光器时,离轴效应是一个必须考虑的因素。

三、讨论

以上我们已经发现,当视场较大时,分裂级滤光器存在一些缺陷。自然,如果将分裂级也做成宽场的,是可以避免这些不利之处的。图3a和3b给出的就是一个宽场分裂级滤光器单元和与之等效的Lyot滤光器。从图中我们看到,分裂级滤光器以增加5片消色差波片的代价获得了一片偏振片的减少。如今的情况和Evans发明分裂级滤光器时的情况有一些不同,例如,如果入射光是偏振光且没有反射损失的话,偏振片的透过率在可见光波段可高达90%以上,而且它比消色差波片便宜得多。在这种情形下,使用分裂级滤光器是不合算的。

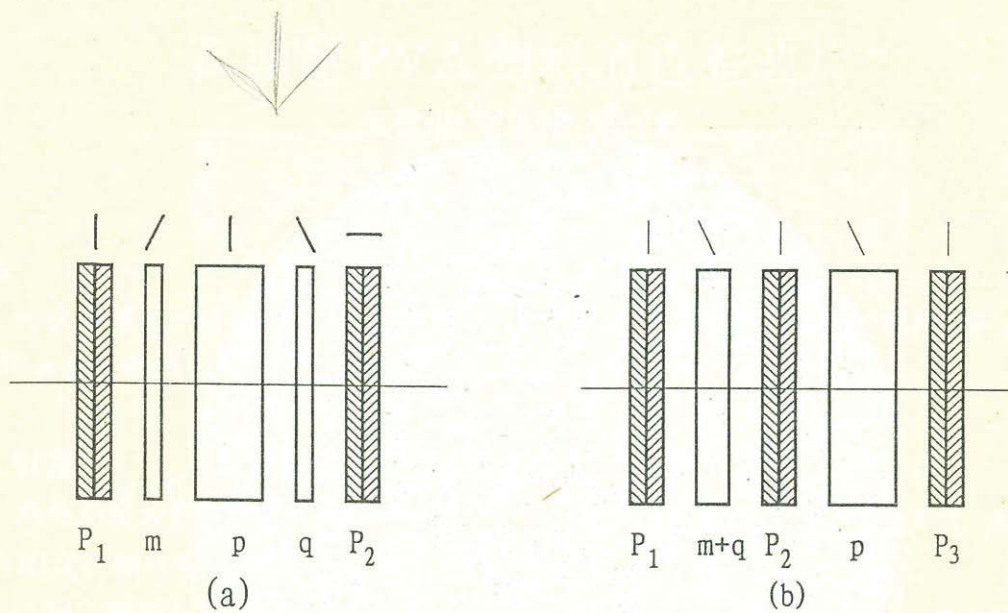
但是,我们并不否定分裂级滤光器的用途,因为在紫外、红外和别的波段上,偏振片的透过率仍然很低。在这些波段,分裂级滤光器仍具有其优势。因此我们的结论是:当使用分裂级滤光器时,必须小心。

参考文献

Evans, J., 1949, J. Opt. Soc. Am., 39, 229

Evans, J., 1949, J. Opt. Soc. Am., 39, 412

Title, A. M. & Rosenberg, W. J., 1979, Applied Optics, 18, A1



图一. 分裂级滤光器的基本结构

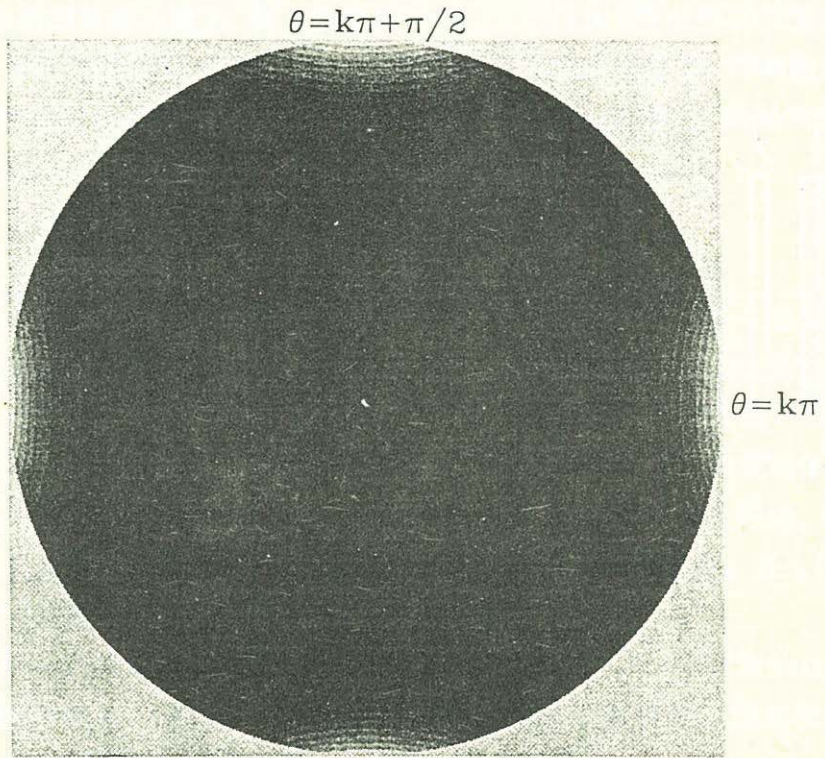
(a). 分裂级滤光器的一个基本单元

(b). 等效于(a)的Lyot滤光器结构

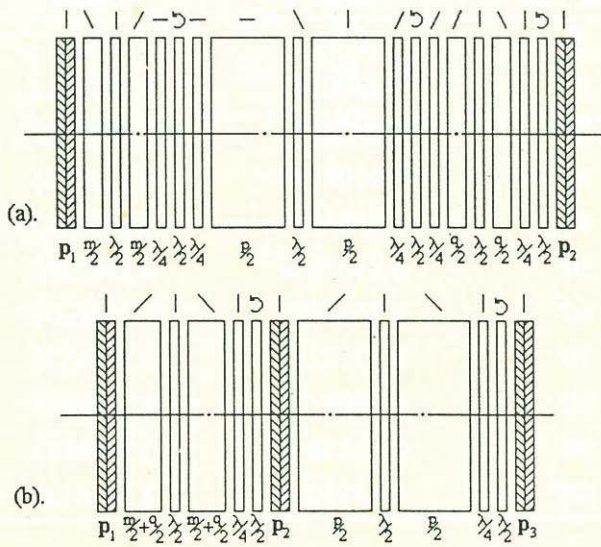
Field of view φ	Column 1	column
0	0.25	0.25
10'	0.2500121	0.2500121
20'	0.2501621	0.2501623
30'	0.2508116	0.2508126
40'	0.2525575	0.2525607
50'	0.2562254	0.2562333
60'	0.2628493	0.2628652
70'	0.2736280	0.2736571
80'	0.2898520	0.2899005
90'	0.3127860	0.3128613
100'	0.3435019	0.3436112

表一. 一个分裂级单元的积分透过率

$$n_j=800, r \approx 1.55, \theta = \pm k\pi/2$$



图二. 分裂级滤光器的亮度形态



图三. 两种类型的宽视场滤光器

$\lambda/2$: 二分一消色差波片

$\lambda/4$: 四分一消色差波片

(a). 分裂级滤光器

(b). Lyot滤光器

高质量PVA塑料消色差波片*

王敬山, 艾国祥, 宋国峰

中国科学院北京天文台, 100080

摘要

本文概述了三片型消色差波片(二分之一波片和四分之一波片)的原理,并讨论了用PVA塑料膜组成的高质量组合消色差波片的性能及测试结果。

一、引言

消色差波片是万能双折射滤光器中非常重要的光学元件之一。一般来讲,消色差波片的设计制作有以下两种方法:

(i) 用不同种双折射材料组成消色差波片。这是根据双折射率随波长 λ 变化的原理设计的。设由几种双折射率材料的晶片,每种材料的双折射率为 $\mu_i(\lambda, t)$,厚度为 $d_i, i=1, 2, \dots, n$,则可由几个方程决定每种材料的厚度,

$$\sum_{i=1}^n \frac{\mu_i(\lambda, t)d_i}{\lambda} = \delta(\lambda), i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中 t 为温度, δ 为延迟量。用两种材料(quartz and MgF_2)制作的消色差波片,我们已经讨论过(邓元勇等,1993),并用在了多通道双折射滤光器中。

(ii) 用多片同种双折射材料组成的消色差波片。这种方法是通过选择每单片的延迟大小、光轴方向来组成消色差波片的(Pancharatnam, 1995; Title, 1975)。材料可选用双折射晶体(如水晶、云母等),也可用PVA塑料延迟膜。

本文主要讨论用PVA塑料膜制作的组合消色差波片的原理及性能。和双折射晶体材料制成的消色差波片相比较,PVA消色差波片有以下几个优点:

- (a) 视场角很大;
- (b) 随温度的变化不大;
- (c) 可以做得很薄,有利于在空间科学和技术中使用;
- (d) 造价低,而双折射晶体消色差波片成本高,而且难于加工。

二、三片型1/2和1/4消色差波片的设计原理

对于同种材料组成的组合延迟片,成为真正的双折射延迟片的条件是:

- (i) 具有稳定的光轴。在Poincare球上,组合片光轴是从球心到赤道上某点的连线
- (ii) 具有稳定的延迟。在Poincare球上,任何形式的偏振光通过它后,都表现为一个绕球心与赤道上某一点的连线(代表光轴)的一个纯正的转动。

对于三片型组合延迟片,只要第一片和第三片的光轴平行,延迟相等,那么该组

* 国家自然科学基金资助项目