

# 等付里叶系数滤光器中的调节波长装置\*

王敬山 艾国祥

中国科学院北京天文台, 100080

## 摘要

在现代双折射滤光器中, 无论在滤光器透过带的调节或移动, 还是在滤光器的调试中, 调节波长装置(Wavelength-Tunable Apparatus, 简称WTA)都有着广泛的应用。本文讨论几种调节波长的方法, 主要是适用于等付里叶系数滤光器(Equal Fourier Coefficient Filter, 简称EFCE)(艾国祥等, 1982)(或Solc型滤光器)的调节波长装置, 并指出不适合等付里叶系数滤光器调节波长的设计方法。

## 一. 引言

双折射滤光器在太阳磁场、速度场的测量研究中, 起着十分重要的作用。调节波长装置的使用, 使得滤光器可以在多条Fraunhofer线上得到太阳磁场、速度场资料。调节波长装置所起的作用, 就是在不改变滤光器透过带轮廓的情况下, 能使滤光器透过不同的波长。这种调节波长的方法主要有以下几种:

(i) 改变每一级晶体的温度。利用晶体厚度随温度的变化, 从而使透过带变化。这种方法一方面调整恒温温度很慢; 另一方面, 滤光器作为一个整体处于恒温状态, 如果分别改变各级晶体的温度, 几乎是不可能的。所以这种方法在滤光器的设计中, 几乎从未用过。

(ii) 在每一晶体级增加不同厚度(延迟)的晶体, 通过调整整体延迟量可以改变透过带的位置。例如: 索列尔补偿器或电光调制器。这种方法也不是很方便, 尽管电光调制器有时也使用(艾国祥等, 1981)。

(iii) 在靠近晶体处放置一与晶体光轴成 $45^\circ$ 的 $1/4$ 波片, 其后跟着一旋转偏振片或 $1/2$ 波片。当旋转偏振片或 $1/2$ 波片时, 可以调节每一级透过带的通过波长。此方法比较实用, 在双折射滤光器的设计中被广泛使用。通常适合于双折射滤光器的调节波长装置有四种类型(如图1所示)。类型A中, 所用光学件少, 但偏振片需要旋转, 它牵涉到后面各晶体级的同步旋转, 很不方便, 一般不采用。类型B比C少用一片 $1/4$ 波片, 既简便又实用, 被许多双折射滤光器(如Lyot型, Evans型, 多通道滤光器和二维光谱仪等)所采用。然而, 对于等付里叶系数滤光器, B型调节波长装置并不适用。本文以二片型等付里叶系数滤光器为例, 说明B型为什么不能用, 并给出正确的设计方案。

\* 国家自然科学基金资助项目

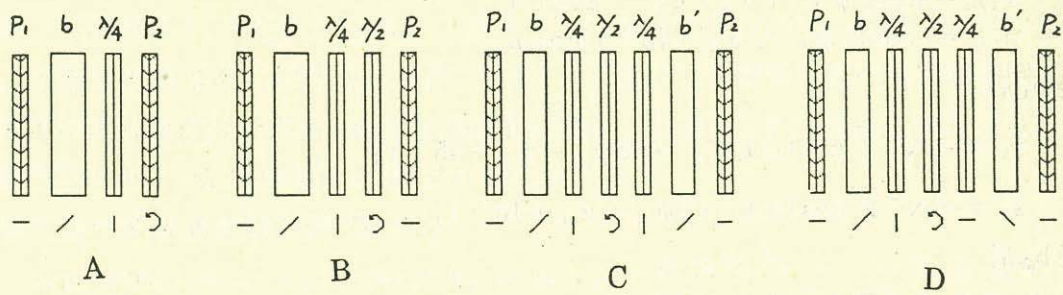


图1. 四种类型波长调节装置

## 二. 等付里叶系数滤光器的透过率

等付里叶系数滤光器是由两偏振片中间，放置数片（设为 $m$ 片）等厚晶片组成（如图2所示），其晶轴间按一定规律的相对方位角设计。设晶片的延迟都为 $\delta$ ，各片晶体轴与第一片偏振片偏振轴成 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 的角度，则其透过率为：

$$P_1 \parallel P_2 \text{ 时,} \\ \tau_{\parallel} = 1/(m+1)^2 [(m+1) + \sum 2(m+1-k) \cos k \delta] \quad (1)$$

$$P_1 \perp P_2 \text{ 时,} \\ \tau_{\perp} = 1/(m+1)^2 [(m+1) + \sum (-1)^k \cdot 2(m+1-k) \cos k \delta] \quad (2)$$

对于两片型等付里叶系数滤光器（图3），两偏振片平行，晶体与第一片偏振片偏振轴间的夹角分别为 $\alpha_1=62^\circ 38'$ ， $\alpha_2=27^\circ 22'$ ，则其透过率为：

$$\tau = [\sin^2 2\alpha_1 \cos \delta + \cos^2 2\alpha_2]^2 \quad (3)$$

透过带轮廓如图4所示。

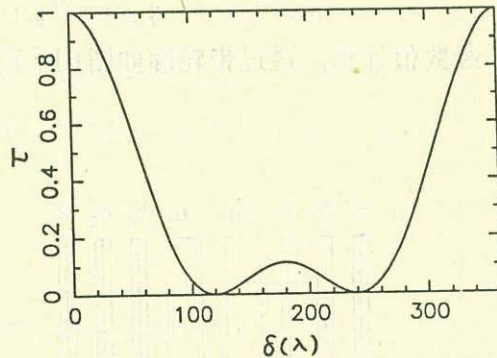
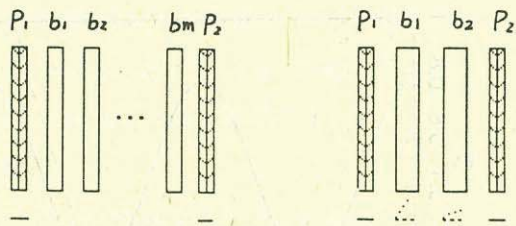


图2. EFCF的光学设计 图3. 二片型EFCF 图4. 二片型EFCF的透过带轮廓

## 三. B型调节波长装置用于二片型等付里叶系数滤光器

如图5所示，设 $b_1, b_2$ 的方位角 $\alpha_1=62^\circ 38'$ ， $\alpha_2=27^\circ 22'$ ，第一片 $1/2$ 波片旋转角度为 $\psi_1$ ，第二片 $1/2$ 波片旋转角度为 $\psi_2$ ， $b_1, b_2$ 的延迟都为 $\delta$ 。下面我们通过推导证明这种设计并不能起到调节波长的作用。

设经偏振片 $P_1$ 后，光的振动为：

$$p_1 = \cos \omega t$$

经第一片 $1/2, 1/4$ 波片（ $r$ 为快轴， $s$ 为慢轴）：

$$r_{1/4} = \sin[2\psi_1 - (\alpha_1 - 45^\circ)] \sin \omega t$$

$$s_{1/4} = -\cos[2\psi_1 - (\alpha_1 - 45^\circ)] \cos \omega t$$

经  $b_1$  后:

$$r_b = -1/\sqrt{2} \cos[\omega t + \delta + (2\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

$$s_b = -1/\sqrt{2} \cos[\omega t - (2\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

经  $b_2$  后

$$r_b = -1/\sqrt{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cos[\omega t + 2\delta + (2\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

$$-1/\sqrt{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos[\omega t + \delta - (2\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

$$s_b = 1/\sqrt{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos[\omega t + \delta + (2\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

$$-1/\sqrt{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cos[\omega t - (2\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

经第二片  $1/4, 1/2$  波片后,

$$r_{1/2} = \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(2\psi_1 - \psi_2 + \alpha_2 - \alpha_1) \sin(\omega t + \delta)$$

$$- \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(2\psi_1 + \psi_2 + \delta) \cos(\omega t + \delta)$$

$$s_{1/2} = -\sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(2\psi_1 - \psi_2 + \alpha_2 - \alpha_1) \sin(\omega t + \delta)$$

$$+ \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(2\psi_1 + \psi_2 + \delta) \cos(\omega t + \delta)$$

经  $P_2$  后,

$$s_{1/2} = -\sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(2\psi_1 - 2\psi_2 + \alpha_2 - \alpha_1) \sin(\omega t + \delta)$$

$$- \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(2\psi_1 + 2\psi_2 + \delta) \cos(\omega t + \delta)$$

那么, 透过率为:

$$\tau = \cos^2(\alpha_1 - \alpha_2) \cos^2[\delta + 2(\psi_1 + \psi_2)]$$

$$+ \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2) \sin^2[2(\psi_1 - \psi_2) + \alpha_2 - \alpha_1]$$

经数值计算, 透过带轮廓如图6所示。

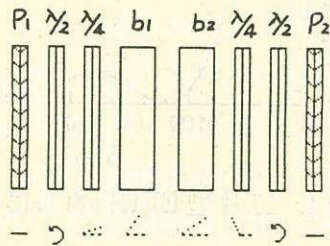


图5. B型WTA用于二片型EFCE

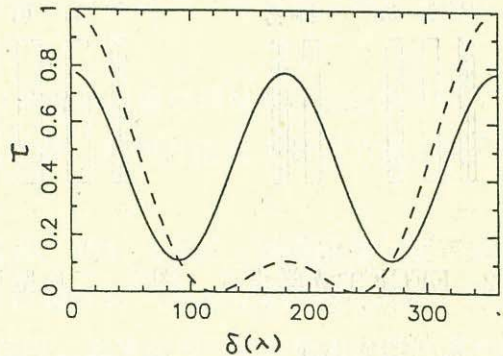


图6. 采用B型WTA后的EFCE透过带轮廓

从图6中可以看出, B型调节波长装置已经改变了二片型等付里叶系数滤光器的透过带波形, 起不到调节波长的作用。

#### 四. 等付里叶系数滤光器中的调节波长装置

在上一节, 证明了 B型调节波长装置不能用在等付里叶系数滤光器中。但可以采用 C型调节波长装置, 把图2中的每一晶片劈开成两部分  $b$  和  $b'$ , 两部分的厚度不一定

相等，中间插入1/4波片+旋转1/2波片+1/4波片的设计结构，在满足一定的条件时，就能起到调节波长的作用（如图7所示）。下面以二片型等付里叶滤光器为例，推导这种设计的透过带。因为b和b'的厚度是任意的，只要b与b'的延迟之和为 $\delta$ 就行。

我们可以令b1, b2'的厚度为0, 那么可调二片型等付里叶系数滤光器如图7所示。

$$\text{设 } x = \cos \alpha_1 = \sin \alpha_2, \quad y = \sin \alpha_1 = \cos \alpha_2$$

经 $P_1$ 后，光的振动为：

$$p_1 = \cos \omega t$$

经第一片1/4波片，

$$r_{1/4} = -x/\sqrt{2} \sin \omega t - y/\sqrt{2} \sin \omega t$$

$$s_{1/4} = -x/\sqrt{2} \cos \omega t + y/\sqrt{2} \cos \omega t$$

经第一片1/2波片，

$$r_{1/2} = x/\sqrt{2} \sin[\omega t - (\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)] + y/\sqrt{2} \sin[\omega t + (\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

$$s_{1/2} = -x/\sqrt{2} \cos[\omega t - (\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)] + y/\sqrt{2} \cos[\omega t + (\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

经第二片1/4波片，

$$r_{1/4} = x/\sqrt{2} \cos[\omega t - 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)] + y/\sqrt{2} \cos[\omega t + 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

$$s_{1/4} = -x/\sqrt{2} \cos[\omega t - 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)] + y/\sqrt{2} \cos[\omega t + 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)]$$

经 $b_1$ 后，

$$r_b = x \cos[\omega t + \delta_1 - 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)] = x \cos(\omega t + \Delta_1)$$

$$s_b = y \cos[\omega t + 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)] = y \cos(\omega t + \Delta_2)$$

其中  $\Delta_1 = \delta_1 - 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)$

$$\Delta_1 = 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ)$$

经 $b_2$ 后，

$$r_b = 2x^2y \cos(\omega t + \Delta_1 + \delta_2) + y(y^2 - x^2) \cos(\omega t + \Delta_2 + \delta_2)$$

$$s_b = -x(y^2 - x^2) \cos(\omega t + \Delta_1) + 2xy^2 \cos(\omega t + \Delta_2)$$

经第三片1/4波片，第二片1/2波片，第四片1/4波片后，

$$\begin{aligned} r_{1/4} = & \frac{2x^2y}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_1 + \delta_2 - 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)] \\ & + \frac{y(y^2 - x^2)}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_2 + \delta_2 + 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)] \\ & - \frac{x(y^2 - x^2)}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_1 + 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)] \\ & + \frac{2xy^2}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_2 + 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)] \end{aligned}$$

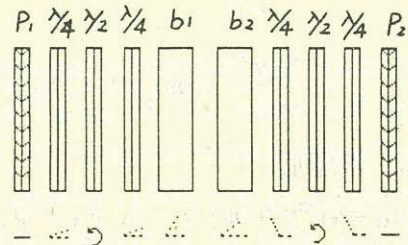


图7. 适用于EFCF的WTA

$$\begin{aligned}
s_{1/4} = & -\frac{2x^2y}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_1 + \delta_2 - 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)] \\
& -\frac{y(y^2-x^2)}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_2 + \delta_2 - 2(\psi_2 - \beta_2 + 45^\circ)] \\
& -\frac{x(y^2-x^2)}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_1 + 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)] \\
& +\frac{2xy^2}{\sqrt{2}} \cos[\omega t + \Delta_2 + 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)]
\end{aligned}$$

经  $P_2$ , 整理后,

$$\begin{aligned}
p_2 = & 4x^2y^2 \cos[\delta - 2(\psi_1 + \psi_2)] \cos(\omega t + \delta) \\
& + y^2(y^2 - x^2) \cos[\omega t + \delta + 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ) - 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)] \\
& - x^2(y^2 - x^2) \cos[\omega t + \delta - 2(\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ) + 2(\psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ)]
\end{aligned}$$

当  $\psi_1 - \alpha_1 + 45^\circ = \psi_2 - \alpha_2 + 45^\circ$ , 即  $\psi_1 - \alpha_1 = \psi_2 - \alpha_2$  时, 有:

$$\begin{aligned}
P_2 = & [4x^2y^2 \cos[\delta - 2(\psi_1 + \psi_2)] + (y^2 - x^2)^2] \cos(\omega t + \delta) \\
= & [\sin^2 2\alpha_1 \cos[\delta - 2(\psi_1 + \psi_2)] + \cos^2 2\alpha_2] \cos(\omega t + \delta)
\end{aligned}$$

那么, 透过率为:

$$\tau = \{\sin^2 2\alpha_1 \cos[\delta - 2(\psi_1 + \psi_2)] + \cos^2 2\alpha_2\}^2 \quad (4)$$

和第二节中(3)相比, 波形没有改变, 因为  $\delta - 2(\psi_1 + \psi_2) = (\mu d)/\lambda - 2(\psi_1 + \psi_2)$ ,  $\psi_1, \psi_2$  的变化能使透过带随波长变化, 因而能起到调节波长的作用。

## 五. 结论

最常用的B型调节波长装置, 虽然具有少用一片1/4波片的优点, 但并不适用于等付里叶系数滤光器, 在满足一定的条件下, C型调波长装置可以用在等付里叶系数滤光器中。这样, 等付里叶系数滤光器的透过带轮廓也是能够波长调节的。

## 参考文献:

- 艾国祥, 温惠馨, 胡岳风, 1982, 光学学报, 2, 217  
艾国祥, 胡岳风, 1981, 天体物理学报, 1, 273

# Wavelength-tunable Apparatus in Equal Fourier Coefficient Birefringent Filter

Jingshan Wang, Guoxiang Ai

Beijing Astr. Obs., Chinese Acad. Sci., Beijing 100080, China

**Abstract.** In the birefringent filter, wavelength-tunable apparatuses (WTA) is widely used either on tuning and shifting of the passband or on testing of the birefringent filter. Some wavelength-tunable methods, especially suitable to the equal Fourier coefficient (EFC) birefringent filter (Ai, et al., 1982) (or Solc filter), are described in this article. We especially indicate the wrong way and give the correct design of wavelength-tunable design in EFC filter.