窄带干涉滤光片在双折射滤光器中的使用和处理方法

宋国峰，艾国祥

中科院　北京天文台 100080

摘要

应用双折射滤光器测量太阳磁场和速度场。由于技术上的原因，晶体级数不可能做得很多，通常都使用前置干涉滤光片。目前我们设计的带宽0.1Å的用于全日面磁场测量的万能滤光器于1991年8月在北京天文台怀柔太阳观测站投入使用。这台滤光器使用的是带宽只有5Å的前置干涉滤光片。1993年同类的滤光片亦应用于台湾中央大学使用的滤光器中。本文讨论磁场测量中窄带干涉滤光片的使用问题。

一. 引言

窄带干涉滤光片具有体积小，成本低等优点。但由于窄带干涉滤光片中心波长随温度的变化产生漂移，因而温度不均匀还会使整个通光口径内透过波长不一致。这是窄带干涉滤光片固有性质带来的一些使用问题。解决这一问题必须采用恒温的办法。

恒温并没有多少技术可言，只是因为恒温后带来了磁场测量的致命问题 ——附加偏振。它本身不是由于温度的变化产生的，而是来源于为补偿升温导致的干涉滤光片中心波长漂移而采取的使干涉滤光片倾斜的措施。倾斜产生的附加偏振的大小，对磁场测量结果的影响的估计，是我们应用干涉滤光片时要讨论的中心问题，如何尽量减小附加偏振的影响，才是本文讨论的关键问题之所在。

二. 前置干涉滤光片通过带的温度漂移与恒温处理

干涉滤光片的中心波长随环境温度线性变化，温度升高向长波方向移动，温度降低向短波方向移动，尽管对任意一个给定的滤光片来说都是线性的，温度漂移也同原始设计的中心波长有关，变化范围是400nm时为0.015nm/℃到1000nm时为0.03nm/℃。这一数据是在 −50℃ 到 +70℃ 范围内工作的情况，超出这一温度范围会对滤光片产生破坏性影响，而且温度变化超过5℃/minute的骤冷或骤热也可能损坏滤光片。

我们选用的干涉滤光片中心波长是为工作在23℃时设计的，下面是 $\lambda_{\circ 1}=5324\text{Å}$，$\lambda_{\circ 2}=5576\text{Å}$ 的两块干涉滤光片中心波长随温度变化的计算。

首先假定在400nm至1000nm之间函数的变化为线性，则

$$K=(K_2-K_1)/(\lambda_2-\lambda_1)\times(\lambda-\lambda_1)+K_1$$

其中 $K_2=0.03\text{nm/℃}$，$\lambda_2=1000\text{nm}$

$K_1=0.015\text{nm/℃}$，$\lambda_1=400\text{nm}$

λ 为所选滤光片的中心波长，K 为该波长的滤光片的温度变化系数。

$\lambda=5324\text{Å}$ 时

$K=0.015/6000\times(5324Å-4000Å)+0.015=0.0183nm/℃$

$\lambda=5576Å$

$K=0.015/6000\times(5576Å-4000Å)+0.015=0.019nm/℃$

用于全日面太阳磁场观测研究的滤光器，由于放在10cm望远镜的准直光路中，周围的环境温度在无太阳照射时全年可能约为 −20℃到 +40℃之间，在太阳照射下，温度可能要在 +10℃到 +50℃之间变化，所以它工作在 +23℃的时侯并不很多。温度超过40℃时引起的干涉滤光片中心波长的改变将会很严重，而且没有恒温的话，中心波长将随日照的时间长短和位置变化，从而使所选谱线透过率产生随机的起伏，这样就很难用于实际观测。

考虑到恒温的必要，加之致冷又更复杂，所以恒温温度应订的略高一些，才能保证只采用简单的加温电路即可完成恒温功效。根据温度变化的情况：我们将恒温温度订在 +42℃。这样如果选 +23℃时，中心波长5324Å的干涉滤光片，则42℃时其中心波长向长波方向移动量 $\Delta\lambda$ 为

$$\begin{aligned}\Delta\lambda&=(42℃-23℃)\times0.0183nm/℃\\&=19℃\times0.0183nm/℃\\&=3.477Å\end{aligned}$$

同样中心波长5576Å的干涉滤光片，其 $\Delta\lambda$ 为

$$\begin{aligned}\Delta\lambda&=(42℃-23℃)\times0.019nm/℃\\&=19℃\times0.019nm/℃\\&=3.61Å\end{aligned}$$

干涉滤光片中心波长向长波方向移动，将改变观测谱线的透过率，严重时可能压掉所需观测的谱线，为了使干涉滤光片的中心波长与观测谱线相匹配获得良好的单色通光能力，我们需要利用干涉滤光片的下面的性质，对其温度变化予以补偿。

三. 干涉滤光片中心波长紫移的获得

前面讲了干涉滤光片随温度的线性变化，由于恒温温度选择的原因使干涉滤光片中心波长发生了红移。干涉滤光片又一个重要性质是干涉滤光片与光轴的夹角会使滤光片的中心波长产生紫移。

在我们的系统中，滤光片和滤光器都放在准直光路中，滤光片与光轴的夹角即为入射光束对滤光片的入射角，在很小角度的情况下，这种紫移对获得预期的峰值波长很有用，但因随入射角的增大，最大透过率减小而背景则增大，所以当入射角很大时可能导致没有峰值透过率和光谱曲线畸变。

中心波长在入射角小于10°时，紫移的函数由下式给出：

$$\lambda_\alpha=\lambda_o\left[1-\left(\frac{N_e}{N_*}\right)\sin^2\alpha\right]^{1/2}$$

其中：λ_α 为在 α 入射角下的中心波长；

λ_O为正入射时的中心波长；

N_e为前后面的介质折射率；

N_*为干涉滤光片折射率，等于1.8；

α 为入射角。

如果在会聚光和发散光中使用干涉滤光片，其结果也于前述的这种离轴平行光束的结论有区别，使用中还必须认真计算，前面已计算过由于温度的改变，导致中心波长向长波方向移动3.477Å和3.61Å，因此我们可以计算在入射角等于多少时，可以使中心波长向短波方向移动大约3.477Å和3.61Å。

表3. 给定入射角的波长变化结果

α	λ_O	λ_α	$\Delta\lambda$
1°	5324.1	5323.847	0.25Å
2°	5324.1	5323.0883	1.021Å
	5576	5574.95	1.048Å
3°	5324.1	5321.823	2.28Å
	5576	5573.642565	2.357Å
4°	5324.1	5320.05	4.05Å
	5576	5571.81	4.1887Å

假定中心波长已偏移3.477Å和3.61Å，则可以计算得到：

$\Delta\lambda$	λ_O	λ_α	α
3.477Å	5327.5Å	5324.1Å	3.74°
3.61Å	5579.6Å	5576Å	3.65°

四. 斯托克斯矢量的改变与补偿

由于恒温温度高于干涉滤光片的设计温度，而采用小角度入射光束补偿了中心波长和透过带随温度的变化。这样我们可以认为透过的波长是我们原来希望得到的理论设计中的中心波长 λ_O，而且我们假定原设计中干涉滤光片通过的为完全非偏振光，即$E_s=E_p$，即它不产生多余的偏振，但由于为补偿温度位移而使干涉滤光片的入射表面倾斜，因而产生了附加偏振。由菲涅尔公式给出这一附加偏振的计算如下：

$$t_s=\frac{A_{2s}}{A_{1s}}=\frac{2\sin\theta_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$t_p=\frac{A_{2p}}{A_{1p}}=\frac{2\sin\theta_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_1-\theta_2)}$$

$$\theta_2=\mathrm{arc}\frac{\sin\theta_1}{n}$$

由前述知：

$$A_{1s}=A_{1p}=A$$

$$I=2A^2$$

$$M=0$$

$$C=0$$

$$S=0$$

通过第一表面：

$$A_{1s}'=A_{1s}t_s=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$A_{1p}'=A_{1p}t_p$$

$$=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_1-\theta_2)}$$

通过第二表面，入射角变为 θ_2，出射角变为 θ_1，即

$$t_s'=\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$t_p'=\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_2-\theta_1)}$$

则

$$A_{2s}'=A_{1s}'t_s'=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)}\cdot\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)}$$

$$A_{2p}'=A_{1p}'t_p'$$

$$=A\frac{2\sin\theta_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_1-\theta_2)}\cdot\frac{2\sin\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_2-\theta_1)}$$

由于没有双折射晶体，视s、p位相相同，即 $\gamma=0$

$$I=A'^2_{2s}+A'^2_{2p}$$

$$=A^2\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)}\right)^2+\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)\cos^2(\theta_1-\theta_2)}\right)^2$$

$$M=A'^2_{2s}-A'^2_{2p}$$

$$=A^2\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)}\right)^2-\left(\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)\cos^2(\theta_1-\theta_2)}\right)^2$$

$$C=2A'_{2s}\cdot A'_{2p}$$

$$=A^2\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)}\cdot\frac{\sin2\theta_1\cdot\sin2\theta_2}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)\cos^2(\theta_1-\theta_2)}$$

$$S=0$$

此向量为

$$1,\ \frac{\cos^2(\theta_1-\theta_2)-1}{\cos^2(\theta_1-\theta_2)+1},\ \frac{\cos^2(\theta_1-\theta_2)}{1+\cos^2(\theta_1-\theta_2)},\ 0$$

如果在滤光片的后面加入一块平行平板玻璃取折射率值为 η，则在y、z平面上倾斜角度 θ_1，由于正交关系，对y、z平面来说的S、P分量即为x、z平面的P、S分量，那么加入平板玻璃将产生附加偏振，其值大小与前面的向量的模相同，但是S、P分量相互含义不同，则对I分量不会发生影响，对M则结果刚好符号相反。

而对于两块非正入射的平板来说，其合成作用的斯托克斯参数有：

$$I_0=I$$

$$M_0=M_1+M_2$$

$$C_0=C_1+C_2$$

$$S_0=S_1+S_2$$

可是加平板玻璃且在垂直方向使其倾斜一角度可以补偿掉附加偏振的M项。然而对C项，由于C项本身是S、P量的振幅乘积的结果，它不能由S、P分量的正交和yx、zy平面的正交而得到补偿。但是有一个令人高兴的因素可以影响斯托克斯参数的这一项，那就是两振动方向垂直的偏振光的位相差的余弦要影响45° 方向上的附加偏振，而1/2波片将产生 ±180° 的位相差，这时恰好使得C项变号。所以只要在补偿片上或者是在滤光片上加上一片1/2波片，则45° 方向上的附加偏振即可补偿掉。

The Problem of Using Interfere Filter in Telescope

Guofeng Song, Guoxiang Ai

Beijing Astronomical Observatory

Chinese Academy of Sciences

Beijing 100080

Almost the instrument that measure the solar magnetic field and velocity field with birefringent filter most using the interfere prefilter.

In 1991, we designed a universal birefringent filter with 0.1 Angstrom passband, in front of the filter we use a interface filter with 5 Angstrom passband.

Some problem we most faced when using the interfere filter. In this paper, we discuss some of the question.