

# 九通道双折射滤光器中组合晶体级的检测方法\*

王敬山<sup>1</sup>, 毛伟军<sup>2</sup>, 邓元勇<sup>1</sup>, 艾国祥<sup>1</sup>

1. 中国科学院北京天文台, 100080

2. 中国科学院南京天文仪器研制中心, 210014

## 提要

九通道双折射滤光器是世界上第一台能够同时观测太阳上不同层次的物理光学仪器。它能同时得到九种不同谱线的太阳单色像。这就要求有些晶体级能够使几种波长的光同时极大地通过。本文就是要讨论这些晶体级的理论设计, 以及在研制中的检测方法。

## 一、引言

在太阳上发生的许多物理现象和过程, 诸如太阳耀斑爆发、日珥爆发、太阳黑子及暗条的演变等等, 几乎都是在很短时间内发生的瞬变现象, 所以同时得到多层次的太阳单色像、太阳矢量磁场和速度场对于太阳物理研究是极为重要的。以往的太阳仪器都做不到这一点。即使是功能强大的万能滤光器, 因为它是单通道的, 要做到同时观测太阳不同层次的物理现象也是不可能的。多通道双折射滤光器(艾国祥等, 1986)的发明解决了这一难题。九通道双折射滤光器是有九通道头和九通道体的多通道滤光器(艾国祥等, 1987), 其特点就是在九通道头中设置较初级次的晶体滤光级, 分出五个通道, 然后在九通道体中的各通道上配置高级次的晶体滤光级, 得到九个不同波长的光。九通道双折射滤光器中的绝大部分晶体级都是由两个或多个波长的谱线公用的, 也就是说能使两个或多个波长的光同时极大地通过, 这就要求晶体的厚度使每个波长的光的延迟为整数或半整数。在下面几节中, 分别讨论九通道双折射滤光器中组合晶体级的理论设计和检测理论方法。

## 二、九通道滤光器组合晶体级的理论设计

设一晶体级中的双折射晶体b的厚度为d, 光轴躺在通光表面上, 那么有

$$\delta = \frac{\mu(\lambda, t)d}{\lambda} \quad (2.1)$$

其中  $\mu(\lambda, t)$  为波长为  $\lambda$  的光在该双折射晶体中的双折射率, 则其透过率为

$$\tau = \sin^2\left(\pi \frac{\mu d}{\lambda}\right) \quad (2.2)$$

当  $\frac{\mu d}{\lambda} = n + \frac{1}{2}$ ,  $n$  为整数时, 透过率为极大。

\* 国家自然科学基金资助项目。

由于晶体的双折射率不能精确地确定, 这些组合级只能按照以一种双折射晶体为主, 再用另一种薄的双折射晶体(两片薄片相减)来补偿的原理来设计, 薄晶体的延迟级数很小, 通过改变其厚度, 就能使整个晶体级的延迟级数成为整数或半整数。九通道滤光器中组合晶体级的设计参数列于表1中。

表1 组合晶体级的设计参数

| No.              | 材料                              | 厚度 (mm)                         | 延迟级数(Wavelength A)         |   |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---|
| 九<br>通<br>道<br>头 | S <sub>1</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 3.901-0.259                | 66.03(3968), 71.00(4686), 63.52(5173), 62.52(5247), 62.48(5250) |
|                  | S <sub>2</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 8.8-1.3                    | 127.0(5173), 125.0(5247, 5250)                                  |
|                  | S <sub>3</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 1.86-0.13                  | 43.0(3968), 35.5(4686)  |
|                  | L <sub>1</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | -4.593+6.856               | 70.0(5576), 66.5(5876), 62.0(6303), 59.5(6563)                  |
|                  | L <sub>2</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 17.414-0.137               | 288.0(5576), 252.0(6303)  |
|                  | L <sub>3</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 10.089-1.047               | 144.0(5576), 126.0(6303)  |
|                  | L <sub>4</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 17.563-0.272               | 266.0(5876), 236.0(6563)  |
|                  | L <sub>5</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 8.781-0.136                | 133.0(5876), 118.0(6563)  |
| 九<br>通<br>道<br>体 | S <sub>6</sub>                  | C+Q                             | -4.314+0.228               | 1462.5(5173), 1438.5(5247), 1437.5(5250)                        |
|                  | S <sub>7</sub>                  | C+Q                             | -8.656-0.197               | 2924.5(5173), 2876.5(5247), 2874.5(5250)                        |
|                  | S <sub>8</sub>                  | C+Q                             | -17.282+0.259              | 5849.5(5173), 5753.5(5247), 5749.5(5250)                        |
|                  | S <sub>9</sub>                  | C+Q                             | -34.592-0.135              | 11698.5(5173), 11506.5(5247), 11498.5(5250)                     |
|                  | S <sub>10</sub>                 | C+Q                             | -69.184-0.270              | 23397.0(5173), 23013.0(5247), 22997.0(5250)                     |
|                  | S <sub>10</sub> '               | C+Q                             | -138.336+0.1146            | 46026.5(5247), 45994.5(5250)                                    |
|                  | L <sub>6</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 35.126-0.544               | 532.0(5876), 472.0(6563)  |
|                  | L <sub>7</sub>                  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 68.304+0.462               | 1065.0(5876), 945.0(6563)                                       |
|                  | L <sub>8</sub>                  | C+Q                             | -14.016-0.118              | 4095.5(5876), 3619.5(6563)                                      |
|                  | L <sub>9</sub>                  | C+Q                             | -112.069+0.265             | 32764.5(5876), 28956.5(6563)                                    |
|                  | L <sub>10</sub>                 | C+Q                             | -56.066-0.473              | 16382.0(5876), 14478.0(6563)                                    |
|                  | L <sub>11</sub>                 | C+Q                             | -28.033-0.236              | 8191.0(5876), 7239.0(6563)                                      |
|                  | L <sub>12</sub>                 | C+Q                             | -6.977+0.546               | 2048.0(5876), 1810.0(6563)                                      |
|                  | L <sub>13</sub>                 | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | -3.164+4.106               | 33.5(5876), 30.0(6563)  |
|                  | L <sub>14</sub>                 | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 34.828+0.274               | 576.0(5576), 504.0(6303)  |
|                  | L <sub>15</sub>                 | C+Q                             | -3.592+0.104               | 1116.0(5576), 972.0(6303)                                       |
|                  | L <sub>16</sub>                 | C+Q                             | -7.182+0.208               | 2231.5(5576), 1943.5(6303)                                      |
|                  | L <sub>17</sub>                 | C+Q                             | -57.518+0.534              | 17851.5(5576), 15547.5(6303)                                    |
|                  | L <sub>18</sub>                 | C+Q                             | -115.093-0.062             | 35702.5(5576), 31094.5(6303)                                    |
|                  | L <sub>19</sub>                 | C+Q                             | -57.518+0.534              | 17851.5(5576), 15547.5(6303)                                    |
| L <sub>20</sub>  | C+Q                             | -28.788-0.298                   | 8925.5(5576), 7773.5(6303) |   |
| L <sub>21</sub>  | C+Q                             | -14.365+0.416                   | 4463.0(5576), 3887.0(6303) |   |
| L <sub>22</sub>  | Q+M <sub>g</sub> F <sub>2</sub> | 2.177+0.017                     | 36.0(5576), 31.5(6303)     |   |

### 三、组合晶体级的检测方法

九通道双折射滤光器中的双折射晶体级分为两个部分, 一部分是短波通道, 包括 3968.468Å, 4685.750Å, 5173.699Å, 5247.063Å 和 5250.211Å 五个谱线通道; 另一部分为长波通道, 包括 5576.106Å, 5875.989Å, 6302.511Å 和 6562.828Å 四个谱线通道。其中的晶体级分别用S或L来表示(如表1)。晶体厚度的测量是用“高精度晶体测厚仪”(杨还等, 1981)实现的。其中有一可调一个波数的索列尔补偿器, 测量时可以得到晶体波数的尾数(小数)部分。由于在九通道双折射滤光器的每一个晶体级中都采用了消

色差调节波长装置(王敬山等, 1991), 只要调整晶体的厚度使得所通过的每条谱线的波数的尾数相等, 就可以用调节波长装置把所有波数调到整数或半整数。因为实验室中很难完全找到所需谱线的灯, 只能采取多种谱线的灯源检测, 然后用插值方法得到在所需谱线下的波数。

组合晶体级厚度的检测方法如下面所述: 先将已经抛光好的双折射晶体在选用的谱线灯下测量出各组合级的波数, 插值出九通道滤光器中谱线上的波数。对下列两种情况分别处理:

(1) 对于通过两条谱线的组合级, 得到这两条谱线的波数后, 改变薄晶体的厚度, 让这两个波数的尾数相等。

(2) 对于通过多条谱线的组合级(如 $S_1, L_1$ 等), 改变薄晶体的厚度, 使得各个谱线的波数尾数相近(在一定误差的范围内)。

组合晶体级有两类, 一类是水晶(厚)+ $MgF_2$ (薄), 另一类是冰洲石(厚)+水晶(薄)。我们以冰洲石+水晶类型的组合级为例, 说明怎样改变薄晶体的厚度来确定组合级的厚度。设一个组合级的冰洲石厚度为 $d_c$ , 在 $\lambda_1, \lambda_2$ 的双折射率为 $\mu_c(\lambda_1)$ 和 $\mu_c(\lambda_2)$ , 水晶(两个薄片相减)的厚度 $d_Q$ , 在 $\lambda_1, \lambda_2$ 的双折射率为 $\mu_Q(\lambda_1)$ 和 $\mu_Q(\lambda_2)$ , 在 $\lambda_1$ 下检测的波数 $N_1 + \Delta N_1$ , 在 $\lambda_2$ 检测的波数为 $N_2 + \Delta N_2$ , 其中 $N_1, N_2$ 为整数, 如果 $\Delta N_1 \neq \Delta N_2$ , 那么改变薄晶体(水晶)的厚度 $\Delta d_Q$ , 产生 $\Delta n_1$ 和 $\Delta n_2$ 的波数变化, 则有

$$\frac{\mu_c(\lambda_1)d_c + \mu_Q(\lambda_1)(d_Q - \Delta d_Q)}{\lambda_1} = N_1 + \Delta N_1 - \Delta n_1 \quad (3.1)$$

$$\frac{\mu_c(\lambda_2)d_c + \mu_Q(\lambda_2)(d_Q - \Delta d_Q)}{\lambda_2} = N_2 + \Delta N_2 - \Delta n_2 \quad (3.2)$$

其中

$$\Delta n_i = \frac{\mu_Q(\lambda_i) \Delta d_Q}{\lambda_i}, \quad i=1, 2 \quad (3.3)$$

根据上面分析, 要求两条谱线波数的尾数相同, 即 $\Delta N_1 - \Delta n_1 = \Delta N_2 - \Delta n_2$ 。把(3.3)代进此式, 有

$$\Delta N_1 - \frac{\mu_Q(\lambda_1) \Delta d_Q}{\lambda_1} = \Delta N_2 - \frac{\mu_Q(\lambda_2) \Delta d_Q}{\lambda_2} \quad (3.4)$$

由(3.4)得到

$$\Delta d_Q = \frac{\Delta N_1 - \Delta N_2}{\mu_Q(\lambda_1)/\lambda_1 - \mu_Q(\lambda_2)/\lambda_2} \quad (3.5)$$

当 $\Delta d_Q$ 的符号与 $d_Q$ 的符号相同时, 为减薄(减薄厚水晶片), 当 $\Delta d_Q$ 的符号与 $d_Q$ 的符号相反时, 便为增厚(减薄薄水晶)。

下面以  $L_8^s$  为例, 说明上述方法的运用。  $L_8^s$  的  $d_c = -3.592\text{mm}$ ,  $d_Q = 0.104\text{mm}$ , 实测在  $\lambda_1 = 6302.511\text{\AA}$  下的波数尾数为  $\Delta N_1 = 0.0161$ , 在  $\lambda_2 = 5576.106\text{\AA}$  下的波数尾数为  $\Delta N_2 = 0.0367$ , 而  $\mu_Q(\lambda_1)/\lambda_1 = 0.0143292465$ ,  $\mu_Q(\lambda_2)/\lambda_2 = 0.0163800225$ , 根据(3.5)式得到  $\Delta d_Q = 10.07\mu\text{m}$ 。因为  $\Delta d_Q$  与  $d_Q$  符号相同, 所以应减薄厚水晶  $10.07\mu\text{m}$ 。

#### 四、讨论

九通道双折射滤光器规模非常庞大, 结构非常复杂, 仅组合晶体级就有31级。利用本文所讨论的方法, 检测了31级中的绝大部分, 都得到很好的结果。对于一些非常厚的冰洲石级(如  $S_7^s, S_8^s, L_7^s, L_8^s, L_9^s, L_{10}^s, L_{11}^s$ ), 其透过波长轮廓非常窄, 而在实验室中得不到单色性非常好的光, 按照本文方法会有较大误差, 我们利用太阳光谱仪, 测量其透过带与太阳谱线之间距离的方法, 得到了较好的效果。

#### 参考文献

- 艾国祥, 胡岳风, 1986, 中国科学A辑, 7, 889  
艾国祥, 胡岳风, 1987, 天体物理学报, 7, 305  
Beckers, J. M., Dickson, L., Joyce, R. S., 1975, AFCRL-TR-75-0090, Instrumentation Papers, No. 227  
王敬山, 艾国祥, 邓元勇, 1991, 天体物理学报, 11, 383  
杨还, 胡岳风, 艾国祥, 1984, 仪器仪表学报, 5, 420

## The Test theory of Combined Crystal Elements in the 9-channel Birefringent Filter

Jingshan Wang<sup>1</sup>, Weijun Mao<sup>2</sup>, Yuanyong Deng<sup>1</sup>, Guoxiang Ai<sup>1</sup>

1. Beijing Astro. Obs., Chinese Acad. of Sci., Beijing 100080

2. Nanjing Astro. Instr. Center, Nanjing 210014

**Abstract.** The 9-channel birefringent filter is the first instrument in the world which can observe the multilayer of solar atmosphere simultaneously. This needs the crystal elements to be passed maximally with a few of spectral line with different wavelengths. In this article, the theoretical design and the test method of the combined crystal elements will be discussed.