

# 带通滤光片研制

会 战 小 组

## 引 言

随着光学技术的发展,在光学仪器中,所用滤光片的类型也随着增多。由于滤光片性能的好坏直接影响光学仪器的质量,本文主要介绍五种带通滤光片的研制。

## 一、技术指标

七六年我们着重在  $0.3-1.0\mu$  光谱区内分成五个连续波段进行工作的,这五个波段为:

1.  $0.3\mu-0.4\mu$
2.  $0.4\mu-0.5\mu$
3.  $0.5\mu-0.6\mu$
4.  $0.6\mu-0.7\mu$
5.  $0.7\mu-1.0\mu$

这五个波段的光学行为是由五种带通滤光片来实现的。这些带通滤光片的制备是我们的研制任务。

$0.3\mu-0.4\mu$ : 紫外区,透射率  $T \geq 60\%$  以上,透射带宽  $W = 1000 \text{ \AA}$  (半宽度)

$0.4\mu-0.5\mu$  } 可见区,透射率:  $T \geq$   
 $0.5\mu-0.6\mu$  } 75%以上,半宽度  $W =$   
 $0.6\mu-0.7\mu$  } 1000  $\text{\AA}$

$0.7\mu-1.0\mu$ : 红外区,透射率:  $T \geq 75\%$  以上,半宽度  $W = 3000 \text{ \AA}$

从  $0.3\mu-1.0\mu$  光谱区内除上述主透射

带外,次峰要  $\leq 6\%$ ,通带内的纹波系数一定要小,滤光片工作视场角可为  $46^\circ$ ,滤光片不均匀性为  $100 \text{ \AA}$ 。显然这些滤光片最好做成矩形,通带内透射率要求尽量的高,滤光片两边截止带要陡,并且要有足够的截止区宽度。

## 二、研制方案

构成带通滤光片的方法很多,如叠加前后截止滤光片、多半波滤光片、颜色玻璃与膜系组合及两种颜色玻璃组合等等,均可构成带通滤光片。怎样才能实现这五种带通滤光片的技术要求呢?我们在所内外进行充分调研基础上,总结已有的实践经验,破除迷信,解放思想,群策群力,集中讨论,根据现有条件制定了如下方案。

### 1. $0.3\mu-0.4\mu$ 波段紫外带通滤光片:

要使  $0.3\mu-0.4\mu$  波段带通滤光片具有高的透射率,而且其它光谱区次峰小于  $6\%$ ,单用叠加反射膜系展宽反射带来完成是很困难的。同时,还要考虑到热蒸发法紫外材料的局限性,及蒸发材料的紫外吸收特性。因此,我们采用了紫外颜色玻璃( $ZWB_1$ )作为实现  $0.3\mu-0.4\mu$  区域带通滤光片的主要手段。从颜色玻璃( $ZWB_1$ )厚  $2.5\text{m/m}$  光谱特性曲线可看出,除在  $7200 \text{ \AA} \pm 200 \text{ \AA}$  波长处有一个透射约  $20\%$  的次峰外,其它指标均可满足要求,因此紫外区主要考虑用典型短波

齿圈径向跳动  $\Delta e_j = 0.006$

齿形误差  $\Delta J_{左} = 0.003$

$\Delta J_{右} = 0.005$

齿向误差  $\Delta B_{x左} = 0.002$

$\Delta B_{x右} = 0.006$

齿面光洁度  $\nabla 7$  以上。

通膜系 (如  $G[\frac{L}{2}H\frac{L}{2}]^6A$ ) 来截除在  $7200 \text{ \AA} \pm 200 \text{ \AA}$  波长处的次峰。

### 2. $0.4\mu-0.5\mu$ 波段带通滤光片:

为了达到此波段有足够好的前后截止特性, 我们选用了宽带通型的颜色玻璃(QB<sub>21</sub>) 作为吸收滤光片, 但它的通带较宽, 两边截止带不陡。因此, 我们采用混合三半波滤光的方法与之叠加, 来保证通带宽度和改善边缘陡度。混合三半波膜系如下:

$$GHLLHLHHLHLLHLA$$

### 3. $0.5\mu-0.6\mu$ 波段带通滤光片:

这个波段带通滤光片的特点是前后截止区都比较宽, 我们采用在颜色玻璃(JB<sub>7</sub>) 和 K9 玻璃上, 分别作一个修正的12层和10层截止膜系胶合而成, 用后者来展宽截止区。

### 4. $0.6\mu-0.7\mu$ 波段带通滤光片:

这个波段带通滤光片。我们采用颜色玻璃(HB<sub>9</sub>) 与修正的短波通干涉截止滤光片叠加来实现带通特性。颜色玻璃(HB<sub>9</sub>) 做长波通滤光片, 截止  $0.3\mu-0.6\mu$  波段区的次峰, 用修正短波通膜系截掉  $0.7\mu-1.0\mu$  波段区次峰, 修正膜系每层膜光学厚度由理论计算给出。

### 5. $0.7\mu-1.0\mu$ 波段带通滤光片:

这种滤光片与前四种的不同, 透射带宽为  $3000 \text{ \AA}$ , 而且短波截止区较长, 我们选用颜色玻璃(HB<sub>10</sub>) 作为截止  $0.3\mu-0.7\mu$  光谱区内的吸收滤光片, 并用修正的短波通膜系与之叠加。这样构成通带  $3000 \text{ \AA}$  的带通滤光片。

## 三、理论计算

如上所述, 研制方案都是采用吸收滤光片和干涉截止滤光片相叠加来实现带通特性的。在  $0.4\mu-0.5\mu$  带通滤光片中, 采用混合三半波滤光片膜系来保证通带宽度和改善陡度。在  $0.5\mu-0.6\mu$ ,  $0.6\mu-0.7\mu$ ,  $0.7\mu-1.0\mu$  这三个波段的带通滤光片中, 都是采用

适当的颜色玻璃做前截止的吸收滤光片和后截止的干涉滤光片相叠加组成的。后截止干涉滤光片如采用典型膜系是方便的:

$$G | (\frac{L}{2} H \frac{L}{2})^s | A$$

其中  $n_g = 1.52$ ,  $n_H = 2.3$ ,  $n_L = 1.38$ ,  $n_A = 1$ 。但是通过计算和制备都发现, 在要求的通带内存在较大的尖深的波纹。如何压缩通带内的波纹, 这是必须解决的一个主要问题, 也是膜系计算的主要任务。

压缩通带内波纹有许多不同途径。常用的方法是在多层膜系的每一侧加匹配层, 使它同基底及同入射媒质匹配起来。我们在  $0.4\mu-0.5\mu$  带通滤光片中的典型混合三半波膜系上附加  $\lambda_0/4$  的低折射率匹配层 L, 就满意地压缩了通带波纹。

在制备混合三半膜系时, 最初采用如下典型膜系:

$$G | HLLHLHHLHLLH | A$$

其中,  $n_g = 1.52$ ,  $n_H = 2.3$ ,  $n_L = 1.38$ ,  $n_A = 1$ ,  $\lambda_0 = 4440 \text{ \AA}$ , 该膜系的理论计算透射率曲线如图一中虚线所示。可见, 这个膜系在通带内有较大的波纹。如果我们注意到半波层是对多层膜组合矩阵没有贡献的虚设层, 用取消半波层的方法, 容易发现上述膜系可归结到

$$G | H HL LH H | A$$

$$G | A$$

因此, 我们想到在上述膜系与空气之间加上一个低折射率匹配层 L, 膜系变为

$$G | HLLHLHHLHLLHL | A$$

此膜系的理论计算曲线如图一中实线所示。可以看出, 通带内透射特性得到显著改善,

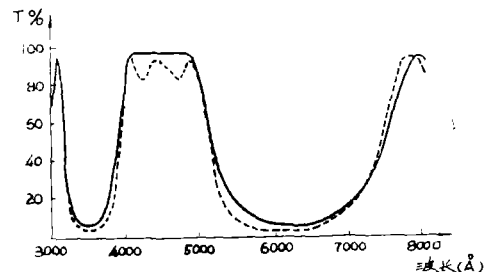


图 一

透射率提高，波纹大大变小。

由于理想匹配层的折射率并不一定存在，所以加匹配层的方法并不是在所有情况下都会收到很好的效果。我们考虑到多层膜的反射率 $R$ （或透射率 $T$ ）是每一层膜的折射率 $n_i$ 和光学厚度 $t_i = n_i \cdot d_i$ 及入射真空波长 $\lambda_j$ 的函数。在给定波长 $\lambda_j$ ，由膜层的光学厚度变化 $\delta t_i$ 引起的反射率变化 $\delta R_j$ 和透射率变化 $\delta T_j$ ，近似地为：

$$\delta R_j = -\delta T_j = \sum_{i=1}^M \frac{\partial R_j}{\partial t_i} \delta t_i + (\text{二阶项})。$$

在 $\delta R_j$ 变化很小时，忽略掉二阶以上的项，将得到足够好的近似，即

$$\delta R_j = \sum_{i=1}^M \frac{\partial R_j}{\partial t_i} \delta t_i$$

因此，我们利用修正膜层厚度的方法来解决 $0.5\mu-0.6\mu, 0.6\mu-0.7\mu, 0.7\mu-1.0\mu$ 这三个带通滤光片中的后截止滤光片通带中尖深的波纹问题的。

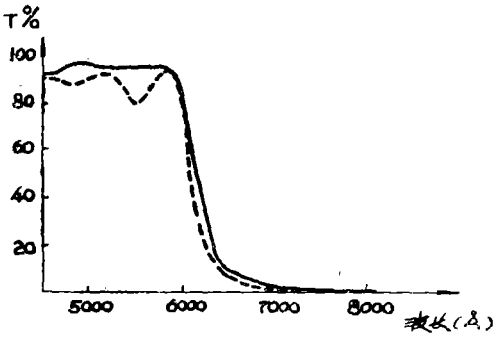
由于镀膜实际希望尽量少的层数的厚度是任意的，因此我们仅用修正膜厚的方法使初始膜系的等效层与基片和与周围媒质间匹配。表1列举了经过修正膜厚以后的膜系参数，为便于比较，把初始膜系的参数也并列在里面。修正前后对应的透射率曲线请见图二、三、四所示的虚线和实线。比较中不难看出，修正后的曲线都大大压缩了通带波纹，并且提高了通带的透射率，而边缘陡度，截止带宽度和深度都同时得到保证。镀膜实践也证实了这种修正尽可能少的膜层厚度改善膜系特性的方法是行之有效的。

在膜系计算与工艺密切配合的过程中，膜系计算不但应计算出切实可行的膜系数据，而且给出透射率对每层膜厚度变化的灵敏度 $\frac{\partial R_j}{\partial t_i}$ ，这对于提供控制误差和分析实验

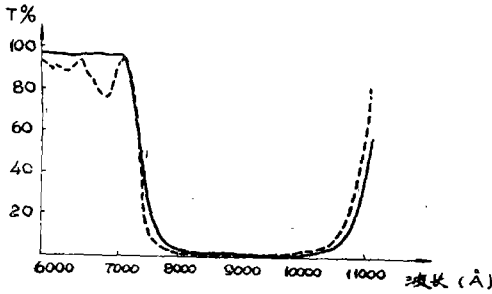
曲线寻找改进方向都有很大的好处。

表 1

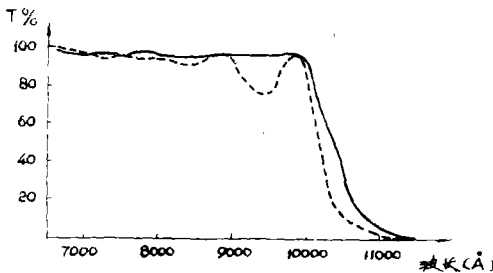
| 膜序    | 折 射 率 | 光 学 厚 度 (埃)          |       |                      |       |                      |       |
|-------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
|       |       | 0.5 $\mu$ -0.6 $\mu$ |       | 0.6 $\mu$ -0.7 $\mu$ |       | 0.7 $\mu$ -1.0 $\mu$ |       |
| $n_g$ | 1.52  | 修正前                  | 修正后   | 修正前                  | 修正后   | 修正前                  | 修正后   |
| 1     | 1.38  | 去掉                   | 去掉    | 1075                 | 去掉    | 1525                 | 去掉    |
| 2     | 2.30  | 1825                 | 2263* | 2150                 | 2660* | 3050                 | 3782* |
| 3     | 1.38  | "                    | 1935* | "                    | 2280* | "                    | 3386* |
| 4     | 2.30  | "                    | 1825  | "                    | 2150  | "                    | 3050  |
| 5     | 1.38  | "                    | "     | "                    | "     | "                    | "     |
| 6     | 2.30  | "                    | "     | "                    | "     | "                    | "     |
| 7     | 1.38  | "                    | "     | "                    | "     | "                    | "     |
| 8     | 2.30  | "                    | "     | "                    | "     | "                    | "     |
| 9     | 1.38  | "                    | "     | "                    | "     | "                    | "     |
| 10    | 2.30  | "                    | "     | "                    | "     | "                    | "     |
| 11    | 1.38  | "                    | "     | "                    | "     | "                    | 3230* |
| 12    | 2.30  | "                    | 2026* | "                    | 2386* | "                    | 3355* |
| 13    | 1.38  | 912.5                | 850*  | 1075                 | 1000* | 1525                 | 1525  |
| $n_s$ | 1.0   | 图 二                  |       | 图 三                  |       | 图 四                  |       |



图二



图三



图四

## 四、制 备

### 1. 0.3μ—0.4μ波段带通滤光片:

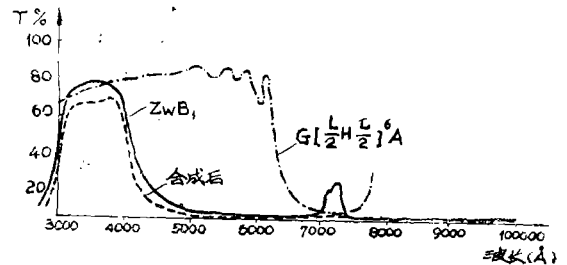
此波段采用颜色玻璃(ZWB<sub>1</sub>)与典型短波通膜系叠加来实现。颜色玻璃(ZWB<sub>1</sub>)在紫外区0.3μ—0.4μ内最大透射率79%左右。在波长7200埃±200埃处20%次峰用典型短波通膜系截止区加以抑制。

膜系为:

$$G\left[\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right]^6A$$

$n_g = 1.46, n_H = 1.75$  (氟化铅),  $n_L = 1.35$  (冰晶石),  $n_A = 1\lambda_0 - 7200 \text{ \AA}$ 。

紫外区透明的高折射率材料用氟化铅(PbF<sub>2</sub>),这种材料的折射率是变化的( $n_H = 2.1-1.75$ )在0.2μ以前有吸收,在波长0.28μ—1.0μ范围内,折射率为1.75,易分解,我们是用铂金丹在306#装置中热蒸发进行的。蒸发时真空度为 $1 \times 10^{-6}$  mmHg慢速蒸发。低折射率材料用冰晶石(Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>)折射率 $n_L = 1.35$ 。共做十三层,对于紫外来说,控制波长λ。7200 Å的十三层膜是比较厚的,因此紫外吸收比较严重,同一个膜系在可见区透射率达90%左右。紫外区透射率只有75%。为提高透射率在石英基底上,一面镀多层膜,在另一面镀消反射膜。最后用颜色玻璃以保护。光谱特性曲线如图五所示。



图五 短波通膜系 $G\left[\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right]^6A$ 颜色玻璃(ZWB<sub>1</sub>)及其合成后光谱特性曲线

### 2. 0.4μ—0.5μ波段带通滤光片:

此波段用颜色玻璃(QB<sub>21</sub>)与混合三半波膜系叠加来实现的。颜色玻璃(QB<sub>21</sub>)吸收掉0.3—0.4μ及0.5μ—1.0μ光谱区内的次峰。三半波膜系为:

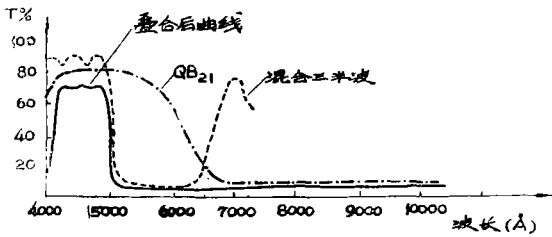
$$G \underline{HLLHLHHL} \underline{HLLHLA}$$

$$k9-1 \quad k9-2 \quad k9-3$$

$n_g = 1.52, n_H = 2.3, n_L = 1.38, n_A = 1$ 。用三块k9玻璃比较片控制十层膜。用波长扫描法控制每层膜厚度。最后用镀有消反射膜层的颜色玻璃(QB<sub>21</sub>)将多层膜加以保护。其光学特性曲线如图六所示。

### 3. 0.6μ—0.7μ波段带通滤光片:

此波段用颜色玻璃(HB<sub>6</sub>)吸收掉0.3μ—0.6μ内次峰与修正的短波通膜系叠加实现的修正膜系的每层膜光学厚度通过理论计算给出(见表1, 0.6μ—0.7μ)共修正四层,为

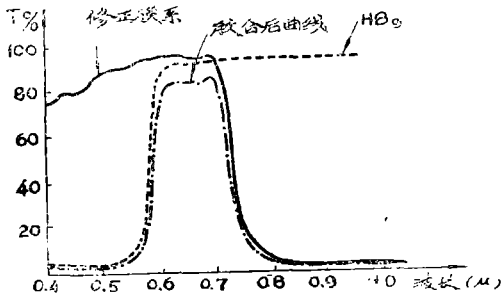


图六 混合三半波膜系GHLHLHLHHLHLHLA、颜色玻璃(QB<sub>21</sub>)及叠合后光谱特性曲线

控制方便我们用波长扫描法,改变单色仪波长来控制第一、二、十一、十二这四层膜的厚度。修正膜系曲线的平滑区宽可达2000 Å,透射率达90%以上。最后用颜色玻璃加以保护。修正膜系如下:

$$\begin{array}{c}
 \ast \ast \\
 \text{GHLHLHLHLHLHLA} \\
 n_g = 1.52, n_H = 2.3, n_L = 1.38, \\
 n_A = 1.
 \end{array}$$

其光谱特性曲线如图七所示。



图七 修正膜系,颜色玻璃(HB<sub>9</sub>)及其胶合后光谱特性曲线

#### 4. 0.7μ—1.0μ带通滤光片:

这个波段的滤光片,是用HB<sub>15</sub>颜色玻璃和后截止滤光片组成。主要考虑是在3000 Å波段范围内有较平坦的透射区。对此采用一般的后截止膜系是难以满足上述要求的。我们的工艺是在对下述12层后截止膜系:

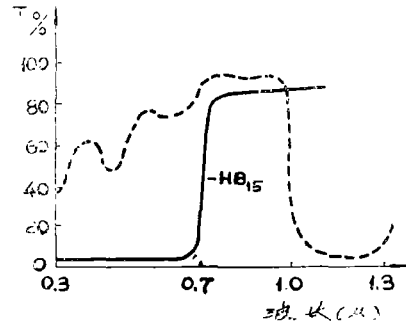
$$\text{GHLHLHLHLHLH0.5LA}$$

的前两层和后两层加以修正的设计基础上,用极值法控制来实现的。

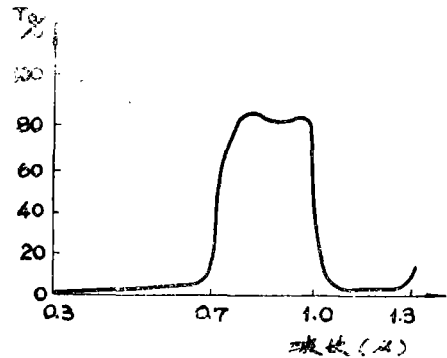
$$\begin{array}{c}
 n_g = 1.52, n_H = 2.3, n_L = 1.3, \\
 n_A = 1
 \end{array}$$

膜系为:GH\*<sup>1</sup>H\*<sup>2</sup>2L 2H 2L 2H 2L 2H 2L 2H 2L 2HLA(\*<sup>1</sup> \*<sup>2</sup>表示用两个比较片控制)。在制备过程中使第1层、第2层、第10层和第11层膜略厚些,根据设计对膜厚修正(见表1),控制厚度变化。

实验曲线如图八所示和HB<sub>15</sub>合成后曲线如图九。在0.7μ—1.0μ通带波段范围内,平均透射率达80%以上。在0.3μ—0.7μ和1.0μ—1.3μ截止良好。



图八 HB<sub>15</sub>和后截止光谱曲线



图九 HB<sub>15</sub>和后截止膜胶合曲线

#### 5. 0.5μ—0.6μ带通滤光片:

要获得此波段内的带通滤光片是有一定困难的。主要考虑是在0.6μ—1.0μ的4000 Å波段范围内有较宽截止区。为此,采用在颜色玻璃(JB<sub>7</sub>)和k9玻璃上,分别作一个修正的12层和10层后截止膜系胶合而成。前一个膜系是为保证在0.5μ—0.6μ内有较好透透而且通带长波有较好截止陡度。后一个膜系即保证第一条曲线通带区有较好透透,又能展宽截止区。

膜系为:

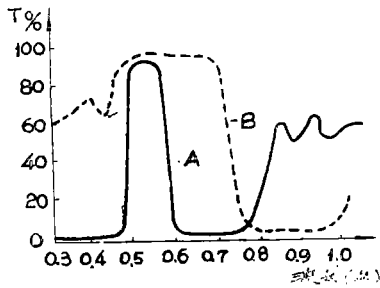
G (JB<sub>7</sub>)<sub>2</sub>H\*<sup>1</sup> H\*<sup>2</sup> 2L 2H 2L 2H 2L 2H  
2L 2H 2L 2HLA n<sub>H</sub> = 2.3 n<sub>L</sub> = 1.38

曲线如图十A所示。

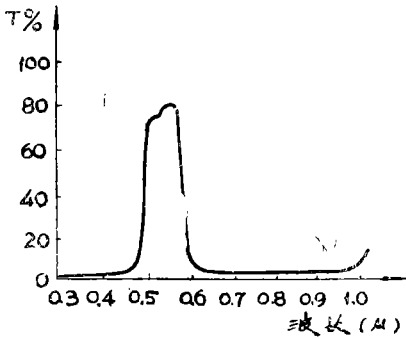
G(K<sub>0</sub>)H\*<sup>1</sup>H\*<sup>2</sup> 2L 2H 2L 2H 2L 2H 2L  
2H 2L 2HLA

曲线如图十B所示。

这两种膜胶合后的光谱曲线如图十一。



图十



图十一 为图十两曲线胶合曲线

从图十一可见，在通带波段 $0.5\mu-0.6\mu$ 范围内，平均透射率达75%，并在 $0.3\mu-0.5\mu$ 和 $0.6-1.0\mu$ 两个波段范围内截止良好。

后两种滤光片，是在中心控制的306#镀膜机镀制的。但按照过去平放基片的办法，镀制 $\phi 50-\phi 80\text{m/m}$ 的滤光片，膜层的均匀

性是难以实现的，为此，我们采用了倾斜基片办法，较好地达到了均匀性指标要求。

## 讨 论:

以上五种带通滤光片的研制，在室党支部领导下，会战组全体同志努力及全室同志大力支持下完成的。在研制过程中采用修正少数几层膜厚度的方法来压缩通带波纹，并且利用波长扫描方法和极值法控制任意厚度膜层。事实证明，这种方法是可行的。更精确的任意厚度的控制还有待于控制手段的提高。现有干涉滤光片是在306#装置上用热蒸发方法进行的，为保持膜层牢固性，用盖板玻璃加以保护。如果采用电子束蒸发可提高膜层牢固性和扩大镀膜材料的选择范围，从而可不加保护玻璃，并能提高通带透射率和压缩波纹。这项工作过去没做过，与兄弟单位相比，我们差距较大，今后一定虚心向兄弟单位学习。

### 参考文献:

1. Physics of Thin Films. 1968 Vol. 5.
2. J.O.S.A. 52. 1149—1152(1962).
3. Opt Eng Vol. 14 p312—322 1975.
4. J. O. S. A. Vol. 53. No. 9 p1078 1963.
5. Appl. opt. Vol. 6. No. 8. p1343. 1967.