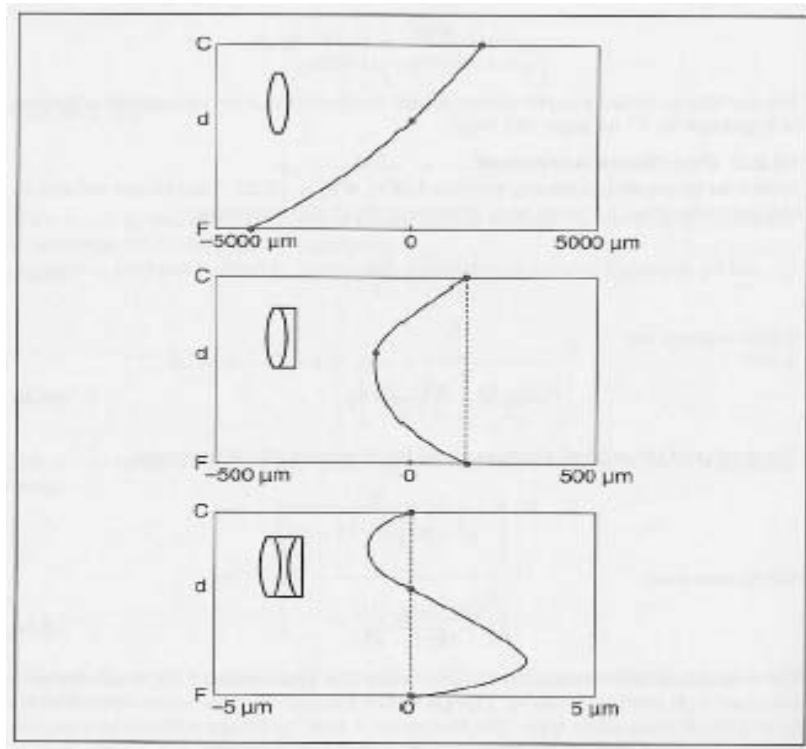


复消色差透镜设计

21.1 简介



三片式的复消色差透镜曾简要介绍过。复消色差透镜能减小二级光谱是通过把三种色光（如 F、d 和 C）聚焦在同一点。单透镜初级色差的轴向图基本为线性。消色差透镜的二级光谱图就有二次特性表现了。复消色差透镜的三重光谱图在被校正光谱段出现三次立方特性。这里将主要复消色差透镜理论，包括各组员光焦度的分配，由此得到输入 Zemax 的初始结构的各面半径。

21.2 复消色差条件

如在 16.5.1 节中所见，一个消色差的薄透镜有两个限制条件：

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 &= \phi \\ \frac{\phi_1}{v_1} + \frac{\phi_2}{v_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (21.1)$$

而复消色差的薄透镜则有三个限制条件：

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 &= \phi \\ \left(\frac{1}{v_1}\right)\phi_1 + \left(\frac{1}{v_2}\right)\phi_2 + \left(\frac{1}{v_3}\right)\phi_3 &= 0 \\ \left(\frac{P_1}{v_1}\right)\phi_1 + \left(\frac{P_2}{v_2}\right)\phi_2 + \left(\frac{P_3}{v_3}\right)\phi_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (21.2)$$

第一个条件是关于光焦度的。第二个条件是关于初级色差的。第三个条件是关于二级光谱的。第二个条件在 19.3 节中推导出。一个近轴可见范围内的复消色薄透镜如图 21.1 所示。因为透镜厚度为零，所以把它们集中表示为一个垂线。注意的是，在例子中，F、d、C 光都会聚在同一焦点上。

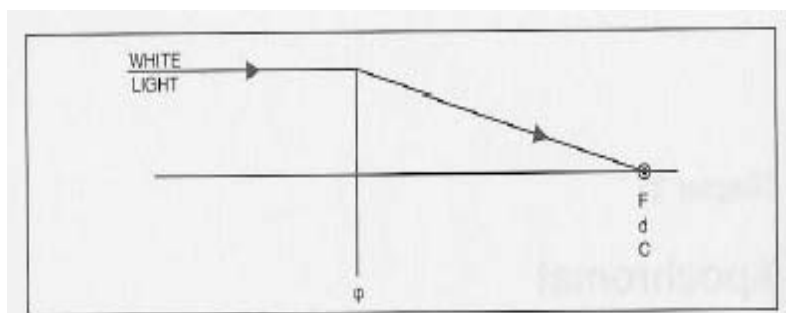


图 1. 近轴复消色差薄透镜

21.3 复消色差的光焦度计算

公式 (21.2) 中包含三个等式和三个未知量。因此有足够条件求出组员的光焦度。用代数方法求解，先求方程组 (21.2) 的行列式：

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{v_1} & \frac{1}{v_2} & \frac{1}{v_3} \\ \frac{P_1}{v_1} & \frac{P_2}{v_2} & \frac{P_3}{v_3} \end{vmatrix} \quad (21.3)$$

展开为：

$$D = \left(\frac{P_3}{v_2 v_3} - \frac{P_2}{v_3 v_2} \right) - \left(\frac{P_3}{v_1 v_3} - \frac{P_1}{v_3 v_1} \right) + \left(\frac{P_2}{v_1 v_2} - \frac{P_1}{v_2 v_1} \right)$$

$$D = \frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} + \frac{\Delta P_{13}}{v_1 v_3} + \frac{\Delta P_{21}}{v_1 v_2} \quad (21.4)$$

同样还可以得到其它三个行列式，第一个：

$$D_1 = \begin{vmatrix} \phi & 1 & 1 \\ 0 & \frac{1}{v_2} & \frac{1}{v_3} \\ 0 & \frac{P_2}{v_2} & \frac{P_3}{v_3} \end{vmatrix} \quad (21.5)$$

并可推倒出：

$$D_1 = \left[\frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} \right] \phi \quad (21.6)$$

第二个行列式：

$$D_2 = \begin{vmatrix} 1 & \phi & 1 \\ \frac{1}{v_1} & 0 & \frac{1}{v_3} \\ \frac{P_1}{v_1} & 0 & \frac{P_3}{v_3} \end{vmatrix} \quad (21.7)$$

可推出：

$$D_2 = \left[\frac{\Delta P_{13}}{v_1 v_3} \right] \phi \quad (21.8)$$

第三个行列式：

$$D_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \phi \\ \frac{1}{v_1} & \frac{1}{v_2} & 0 \\ \frac{P_1}{v_1} & \frac{P_2}{v_2} & 0 \end{vmatrix} \quad (21.9)$$

可推出：

$$D_3 = \left[\frac{\Delta P_{21}}{v_2 v_1} \right] \phi \quad (21.10)$$

因此可求出第一个组员的光焦度 ϕ_1 ：

$$\phi_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{\left[\frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} \right] \phi}{\frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} + \frac{\Delta P_{13}}{v_1 v_3} + \frac{\Delta P_{21}}{v_1 v_2}} \quad (21.11)$$

$$\phi_1 = \frac{\Delta P_{32} \phi}{\Delta P_{32} + \frac{\Delta P_{13} v_2}{v_1} + \frac{\Delta P_{21} v_3}{v_1}} \quad (21.12)$$

分母乘以 v_1/γ_1 ，公式变形为：

$$\phi_1 = \frac{v_1 \Delta P_{32} \phi}{v_1 \Delta P_{32} + v_2 \Delta P_{13} + v_3 \Delta P_{21}} \quad (21.13)$$

同样方式可求出 ϕ_2 ， ϕ_3 ：

$$\phi_2 = \frac{v_2 \Delta P_{13} \phi}{v_1 \Delta P_{32} + v_2 \Delta P_{13} + v_3 \Delta P_{21}} \quad (21.14)$$

$$\phi_3 = \frac{v_3 \Delta P_{21} \phi}{v_1 \Delta P_{32} + v_2 \Delta P_{13} + v_3 \Delta P_{21}} \quad (21.15)$$

21.4 计算实例

下面计算有效焦距 400mm 的复消色薄透镜光焦度，采用玻璃的参数如表 21.1 所示， ΔP_{ij} 如表 21.2 所示。

Table 21.1				
Vendor	Glass	v_d	P_{dc}	n_d
1) Schott	SSKN5	50.88	0.302094	1.658477
2) Ohara	FPL53	94.97	0.308158	1.438763
3) Schott	BAK1	57.55	0.304724	1.572529

Table 21.2	
ΔP_{32}	-0.0013434
ΔP_{13}	-0.002630
ΔP_{21}	+0.006064

将表中数据带入公式 (21.13)：

$$\gamma_1 \Delta P_{32} + \gamma_2 \Delta P_{13} + \gamma_3 \Delta P_{21} = -0.174722 - 0.249771 + 0.348983 = -0.07551$$

$$\phi_1 = \frac{\gamma_1 \Delta P_{32} \phi}{-0.07551} = \frac{-0.0004368}{-0.07551} = 0.005785$$

$$\text{或 } f_1 = 172.869 \text{mm}$$

用相同步骤可求解公式 (21.14)、(21.15)：

$$\phi_2 = 0.008269 \text{ 或 } f_2 = 120.927 \text{mm}$$

$$\phi_3 = -0.011554 \text{ 或 } f_3 = -86.548 \text{mm}$$

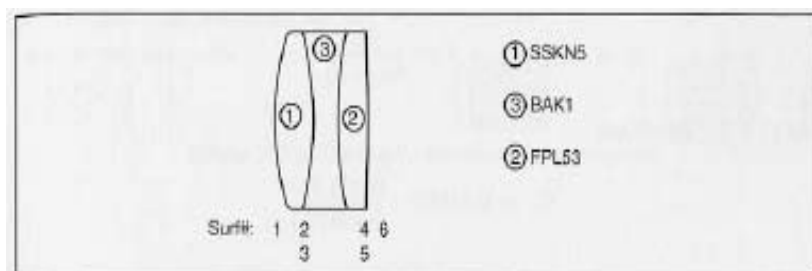


图 2. 复消色透镜结构

(注意：三个透镜的光焦度之和等于 0.0025)

以上得到了三片透镜各自的光焦度，下面计算它们初始结构的曲率。由于色差校正并不依赖于组员的排列顺序，所以一开始选择两个正透镜夹一个负透镜的结构，如图 21.2 所示。并且假定负透镜是等凹的。即 $C_4 = -C_3$

$$\phi_3 = (n_3 - 1)(C_3 - C_4) = 2C_3(n_3 - 1)$$

$$C_3 = \frac{-0.11554}{(2)(0.572529)} = -0.01009 \quad \text{或} \quad R_3 = -R_4 = -99.105\text{mm}$$

接着计算第一个面的半径：

$$\phi_1 = (n_1 - 1)(C_1 - C_2) \text{ 且 } C_2 = C_3$$

$$C_1 = -0.001304 \quad \text{或} \quad R_1 = -766.533\text{mm}$$

最后一步是求最后面的光焦度：

$$\phi_2 = (n_2 - 1)(C_5 - C_6) \text{ 且 } C_5 = C_4$$

$$C_6 = -0.00875 \text{ 或 } R_6 = -114.205$$

现在我们可以将半径值输入 ZEMAX 了。

21.5 ZEMAX 优化

现在开始在 ZEMAX 中优化色差。首先，把上面计算的半径值及所选取的玻璃（在 F、d 和 C 光谱范围内）输入。让透镜保持零厚度，来核对刚才计算的焦距值。但要保持透镜间一个小的空气间隔（0.001mm）。要注意：上面计算的消色差透镜是厚度为零的薄透镜，且各面都在空气中。在 MFE (优化函数编辑器) 中使用 EFLY 三次，每个透镜使用一次，这样我们就得到了每块透镜的焦距。列表 21.1 表示了 MFE 的结果，焦距值与上面计算的基本相同。

Merit Function Value: 6.84452331E-002

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value	% Cont
1	EFLY		2					4.00000E+002	1	3.99932E+002	100.000
2	EFLY	1	2					0.00000E+000	0	1.72855E+002	0.000
3	EFLY	3	4					0.00000E+000	0	-8.65502E+001	0.000
4	EFLY	5	6					0.00000E+000	0	1.28932E+002	0.000

列表 21.1，薄透镜复消色差系统 MFE 列表

下一步给透镜赋予实际厚度（分别为 10mm，5mm 和 10mm）。结构图如图 21.3 所示，轴向色差如图 21.4 所示。

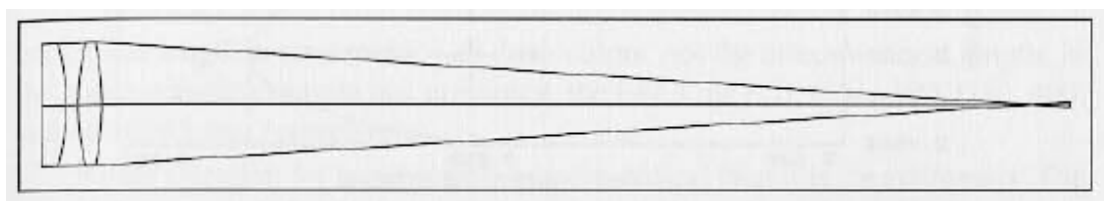


图 21.3. 输入玻璃厚度之后的复消色差初步设计

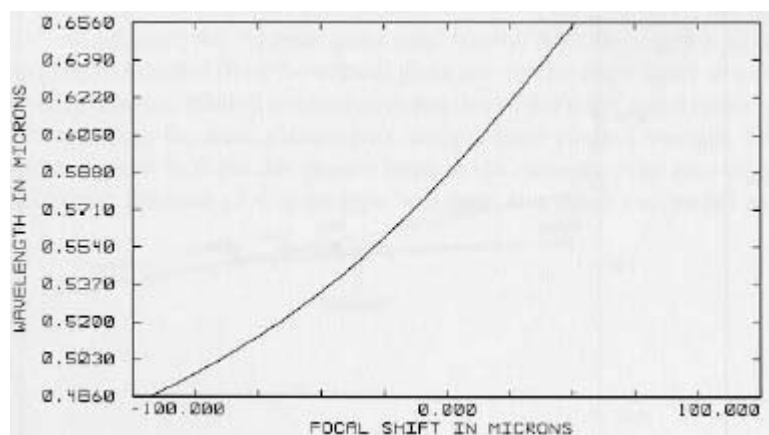


图 21.4. 初步设计的轴向色差图

但很可惜的是这里不能使用算子 AXCL 来校正色差。AXCL 能使两种色光会聚到后焦面的同一点。而我们需要使 F、d 和 C 光都能会聚到一点。如何实现呢？一种方法是使用算子 PARR 和 DIFF。它们在 MFE 中的使用见列表 21.2 所示。这里，PARR 用来确定象面上不同色光的近轴径向光线高度。要使这个算子发挥作用需要指定光线在入瞳面内的径向高度。已采用 $\rho_y = 0.1$ ，指定的象面为面 7。使用了两对 PARR，两种色光一对。这里要注意没有给它们分配权重。接下来在每一 PARR 使用 DIFF，目标值为零，权重为一。在列表 21.3 中可看到优化前设置那些半径为变量。

Merit Function Value: 4.84862372E+000

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value	% Cont
1	FFL		2					4.00000E+002	1	3.91602E+002	100.000
2	FFL	1	2					0.00000E+000	0	1.71032E+002	0.000
3	FFL	3	4					0.00000E+000	0	-0.57023E+001	0.000
4	FFL	5	6					0.00000E+000	0	1.22606E+002	0.000
5	PARR	7	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	0.02708E-004	0.000
6	PARR	7	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	0.00170E-016	0.000
7	DIFF	6	5					0.00000E+000	1	-0.02708E-004	0.000
8	PARR	7	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	0.00170E-016	0.000
9	PARR	7	3	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	2.60646E-004	0.000
10	DIFF	9	8					0.00000E+000	1	2.60646E-004	0.000

Listing 21.2 MFE listing for three color correction.

列表.21.2

SURFACE DATA SUMMARY:							
Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STANDARD		Infinity	Infinity		0	0
ST0	STANDARD		-766.533	10	SSKN5	50	0
2	STANDARD		-99.105 V	0.001		50.18751	0
3	STANDARD		-99.105 P	5	BAK1	50.18710	0
4	STANDARD		99.105 V	0.001		50.17223	0
5	STANDARD		99.105 P	10	FPL53	50.17255	0
6	STANDARD		-114.2052 V	397.2723		50.36112	0
TMA	STANDARD		Infinity			2.121979	0

列表 21.3

优化后色差校正情况如图 21.5 所示。曲线在相关光谱区域内是三次的。注意到曲线确实经过了 F、d 和 C 的光谱点。而且三重光谱最大值为 4 微米，对比有效焦距 400mm 的消色差透镜的二级光谱值为 203mm。

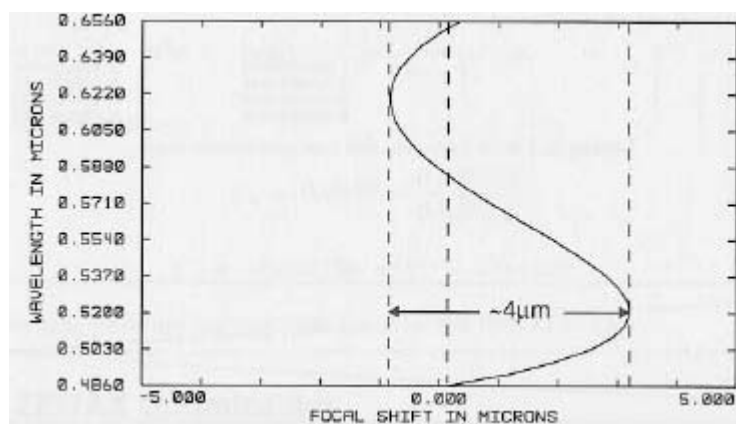
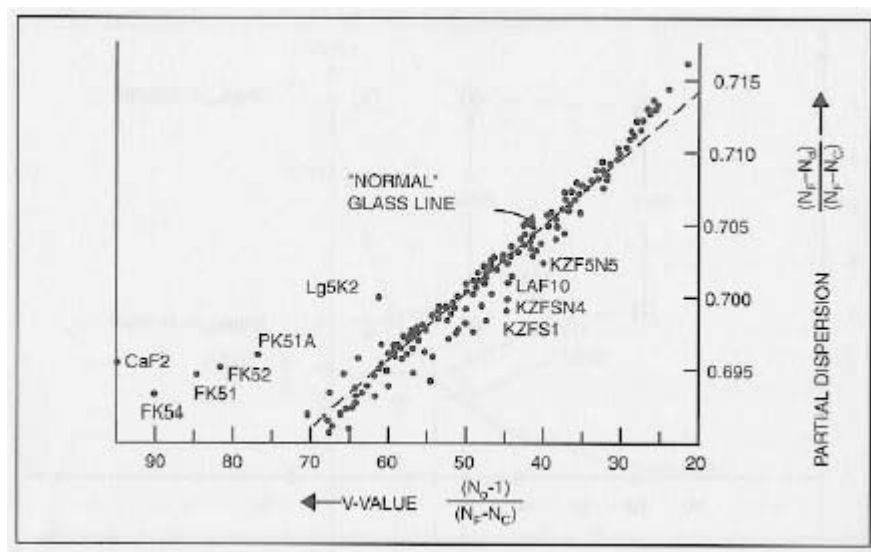


图 21.5. 复消色差例子的轴向色差图

本文唯一的目的就在于证明用三片式的复消色透镜能够实现色差校正。如果引入一定的视场的话，这个结构仍然需要校正球差和慧差。弯曲透镜能否有效的减少这些象差要依赖于玻璃的选择。有时尽管二级光谱校正实现了而且也考虑了使用弯曲，但有些玻璃选择仍然作用有限。

复消色差（消色差）透镜实现色差校正后，三种色光的后焦距是一致的，而不是有效焦距。例如上面的复消色透镜而言，F、d 和 C 光的有效焦距分别为 399.9250, 400, 400.0343mm。



(18.2 节.F-d 光部分色散 vs 阿贝数)

复消色差的玻璃选择比消色差更严格。错误的选择会导致某些面的过大的曲率，这意味这更大的入射角，后者产生更多的象差（尤其是高级象差）。然而有一种凭经验能解决问题的方法，参考部分色散表——（18.2 节）。经验做法为：消色差的两片玻璃在“标准玻璃线上”（或在线附近），而第三片玻璃则要远离线上。（标准玻璃线上的两片玻璃可以当作一块虚拟玻璃，它的部分色散与第三块玻璃相匹配，而第三块玻璃则有更多的特殊材料可供选择。）直线连接这三块玻璃就产生一个三角形。如图 21.6 例子中选用的玻璃。经验表明三角形面积越大，总体设计就越成功。

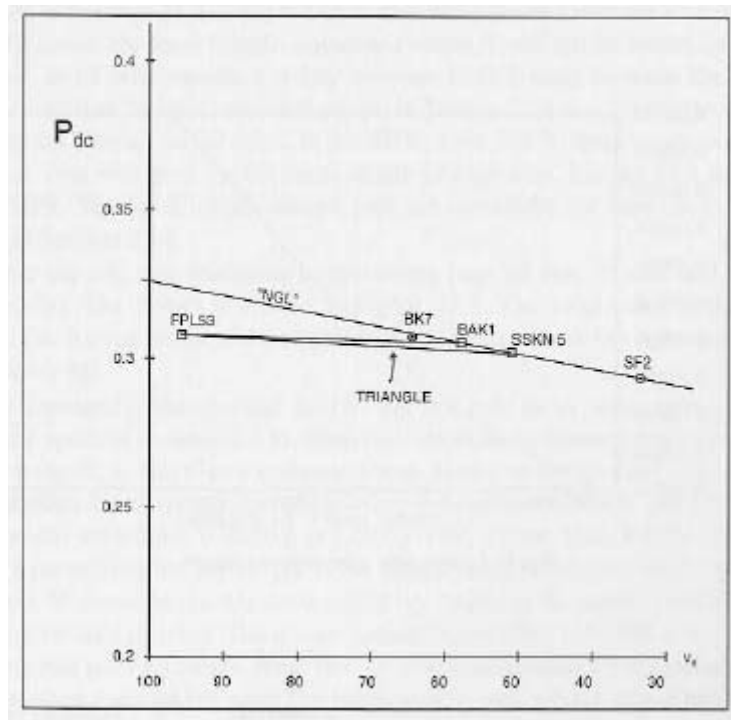


图 21. 6. 所选玻璃的部分色散三角形