

第六章 玻璃和景物镜

翻译：孙浩 QQ: 21573278 光电论坛 ID: huntersun 邮箱: supsh@yahoo.com.cn

6.1 导言

玻璃。。。多么不可思议的材料。没有玻璃（在一些情况下是光学塑料）现代的照相机、便携摄像机、双筒望远镜、天文望远镜乃至 CD 机都不能工作。在这一章，我们将回顾那些对镜头设计者来说重要的玻璃特性。然后我们将继续讨论光阑以及它在轴上位置是怎样被用来控制离轴像差的。Zemax 将被用在经典的后景物镜设计示例中，在此之后你将试着亲自设计前景物镜。

6.2 玻璃特性

6.2.1 折射率

毋庸置疑，折射率是玻璃材料最重要的一个特性。没有它，光线不会偏折，透镜也不能实现，从而不能成像。折射率是光线在真空中传播速度和在玻璃材料中传播速度的比率。

$$n = \frac{c}{v} \quad (6.1)$$

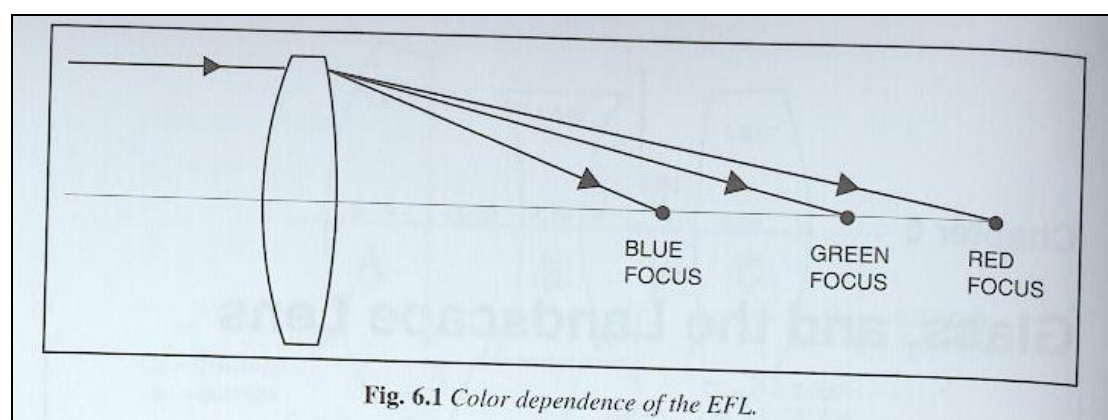
在两个不同折射率媒质的分界面光线发生折射, Snell 定律描述:

$$n_r \sin \theta_r = n_i \sin \theta_i \quad (6.2)$$

当这个定律和球形表面接合时，透镜诞生了伴随着奇妙的像。

6.2.2 色散

现在有个坏消息。当一束准直的白光入射到一片玻璃透镜时，呈现出不同颜色的光束，它们会聚在沿着光轴上的不同点，如图 6.1 所示。



焦距是由波长决定的，颜色沿着光轴展开被称作色差。这将导致差的像质，损失清晰度。

发生这种现象的原因是玻璃的折射率不是定值而是一个和波长有关的函数。这种现象叫色散。特点是折射率在蓝光下高些，红光下低些。这意味着在折射界面蓝色光束比红色光束弯

折的更厉害（如图 6.1 所示）。牛顿认为对于折射光学色散是不可克服的问题，这也是致使他采用反射镜—牛顿天文望远镜完成成像的主要原因。

6.2.3 我们怎样量去化玻璃色散的特性？

在回答这个问题前,我们必须让你了解一些有关标准波长选取的传统协定。在过去为了精确测量折射率,你需要多种颜色可见光波段的明亮光源。那时并没有激光支持。你只能通过燃烧元素的途径得到,像将钠放入本生灯,然后使它发出的光通过棱镜分光计。你挑选一条明亮的线状光谱,使它射入折射计得到这种颜色下的折射率。谨记在白天眼睛的响应峰值是 555nm（绿）。在夜晚,适应暗光的峰值下降到 513nm。表 6.1 展示了折射率测定中使用的

Table 6.1 Spectral Lines		
Wavelength (nm)	Identifier	Spectral Line
404.6	h	Hg (violet)
435.8	g	Hg (blue)
480	F'	Cd (blue)
486.1	F	H (blue)
546.1	e	Hg (green)
587.6	d	He (yellow)
589.3	D	Na (yellow)
643.8	C'	Cd (red)
656.3	C	H (red)
706.5	r	He (red)

传统的线状谱，也是镜头设计者要用的。在此课程中我们将主要用 F,d,e 和 C。图 6.2 展示了这些线状谱在适光下（白天）眼睛响应曲线中的位置。

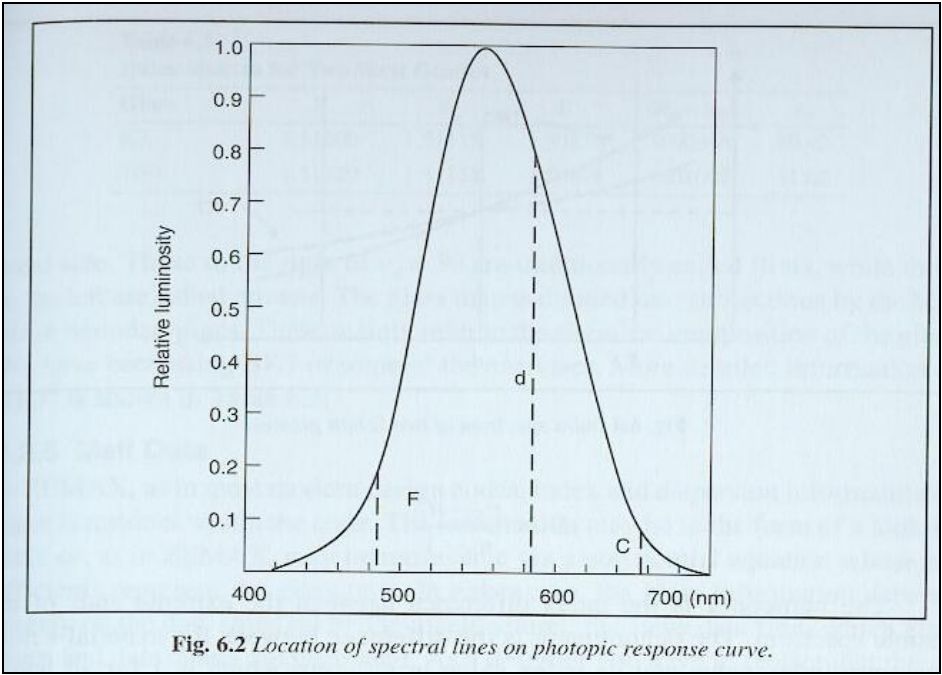
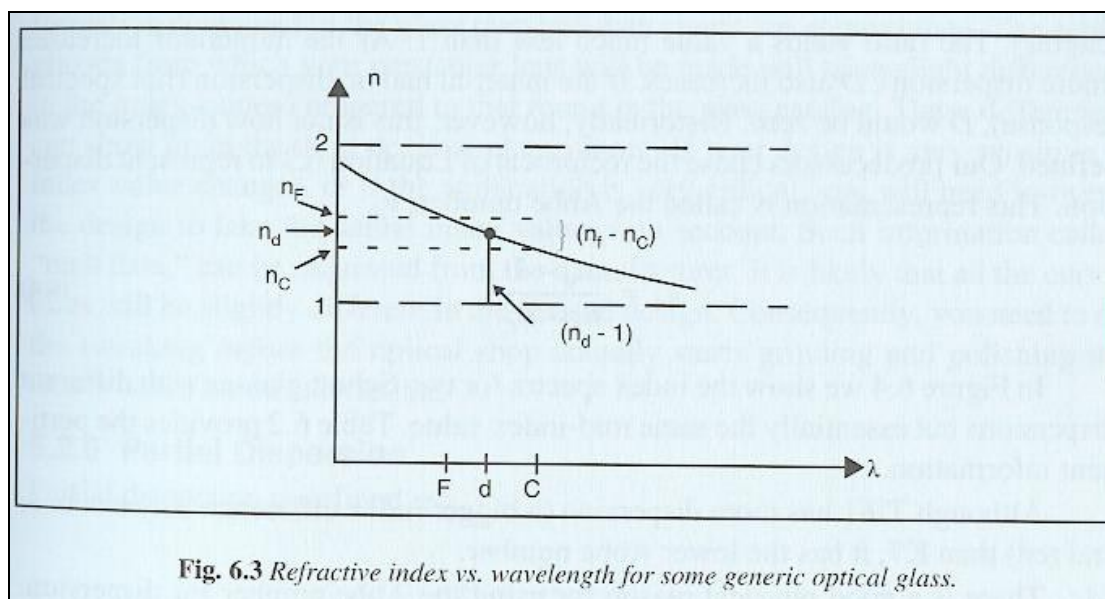


Fig. 6.2 Location of spectral lines on photopic response curve.

现在让我们回到最初关于量化色散的问题。图 6.3 展示了一个普通光谱折射率曲线。在这个曲线中我们分别以 F,d 和 C 波长定义折射率，分别是 n_F ， n_d ， n_C 。



一种色散度量方法是取比率：

$$D = \frac{n_F - n_C}{n_d - 1} \quad (6.3)$$

分子是可见光谱两个端点的折射率之差。分母是中间光谱折射率与真空折射率（所有波长真空折射率都是 1）之差。比率得到比 1 小很多的值。当分母增加时（更大差值）D 也增加。如果材料没有色散（平直的光谱响应），D 值为 0。在历史上，这并不是色散的定义。我们的前辈采用 6.3 式的倒数来表示色散。这种表示方法称作阿贝数， ν_d

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (6.4)$$

图 6.4 展示了不同色散值的两种 Schott 玻璃，但有相同的中间折射率值。表 6.2 提供了相关的信息。

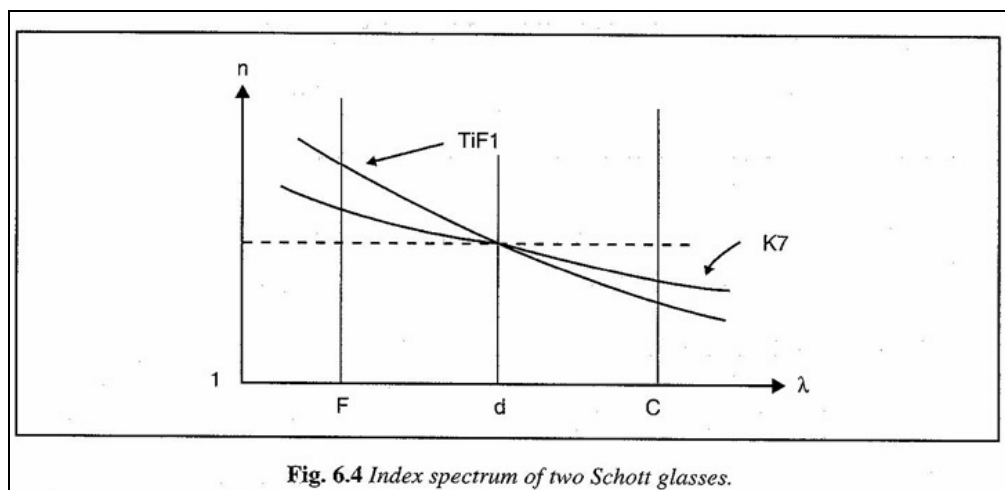


Table 6.2
Index Spectra for Two Scott Glasses

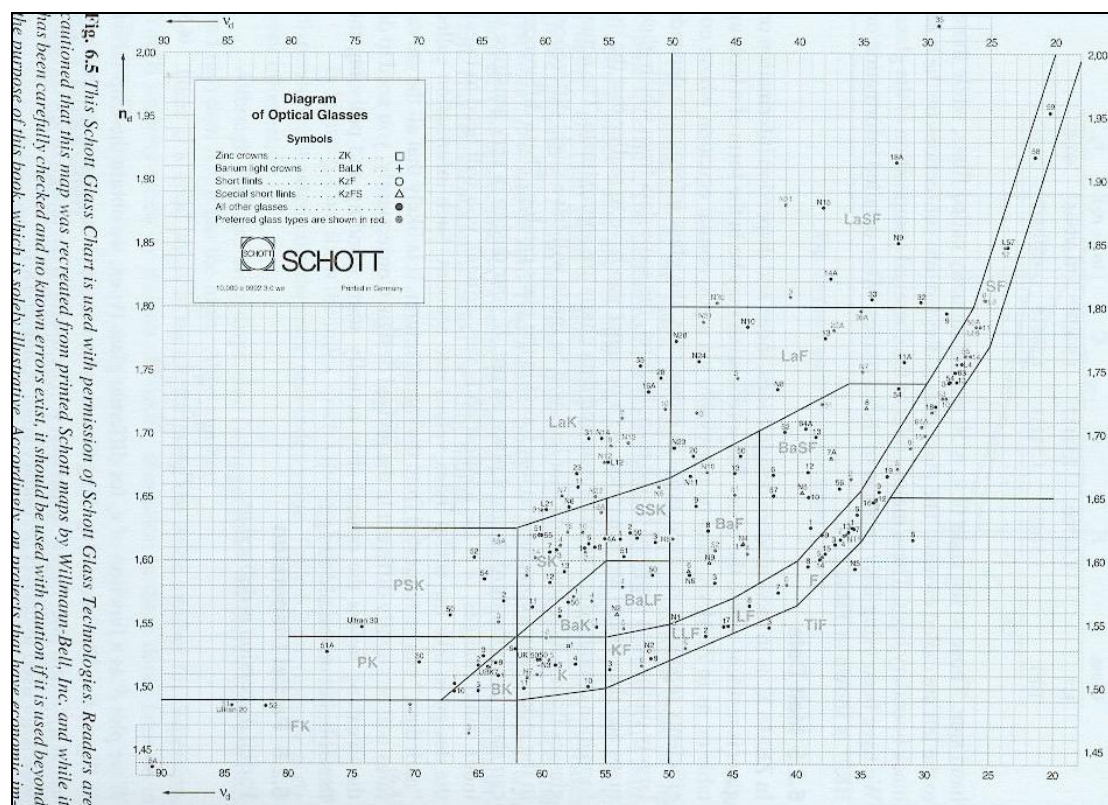
Glass	F	d	C	$(n_F - n_C)$	v_d
K7	1.51700	1.51112	1.50854	0.00846	60.42
TiF1	1.51820	1.51118	1.50818	0.01002	51.02

尽管 TiF1 的色散 ($n_F - n_C$) 比 K7 的色散要大, 但它却有低的阿贝数。

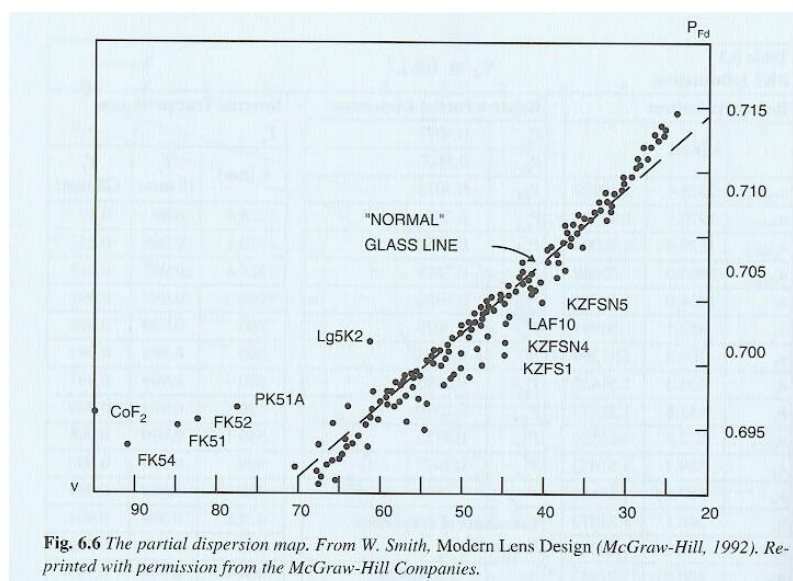
这里有一个使用阿贝数表示色散好的物理原因。在第 16 章我们进一步讨论色差时你会知道为什么。

6.2.4 玻璃表

当今的镜头设计者有大量的光学玻璃能够利用，但很难明了全部的玻璃。最好是有些摘要的性质，一份光学材料和特性的图式表示。图 6.5 展示了 Schott 玻璃的表示。



一个给定的玻璃在图上按照它的中间折射率 n_d 和阿贝数标出。前者作为纵坐标，后者作为横坐标。高色散的玻璃在右边边。传统上，在 $\nu_d = 50$ 右边的玻璃称为火石玻璃，左边的玻璃称为冕玻璃。实线分界线把玻璃表分成几个小部分。这些主要取决于玻璃的化学成分。在一些练习中我们将使用 BK7。表 6.3 展示了 BK7 更多详细的信息。



6.2.7 实际应用的考虑

你确认你得到了一个好的设计。下面问你自己一些实际应用的问题。首先，设计的玻璃有没有难加工的？例如：有没有难以磨抛的材料？第二，你设计的镜头将被用在潮湿的环境中吗？如果在这种环境下使用，有没有吸水的玻璃在你的设计中？第三，玻璃有没有做防止发霉的处理？第四，你设计的镜头受不受极端温度的影响？如果受，对于热环境你的设计有多敏感？机械构件支持不支持由温度升高而引起的透镜膨胀而不使元件破裂。这有许多实际应用的问题，作为一个认真的设计者你必须掌握渊博的知识。

6.3 移动光阑和像差控制

在第三章的作业中（3.7.1 段），你弯曲透镜以最小化球差。而沿着光轴移动光阑对球差并没有任何影响（假定透镜的曲率半径不变）；然而，这对象散和彗差有影响。在下一章我们将进一步讨论离轴像差。现在，我们将依靠 Zemax 来看，当光阑移动时会发生什么。

回到 3.7.1 段的 SINT1o1b。我们首先恢复正确的焦距（因为 4mm 玻璃厚度所引起的偏移）。到 MFE 并设置：

Operand	Target	Weight
EFFL	400	1

现在设计所有半径为“V”。在玻璃最后表面的厚度处使用 M-solve（以得到 BFD）。重新命名文件 SINT1o1b。

SINT1o1b→Optimize→SINT1o1a

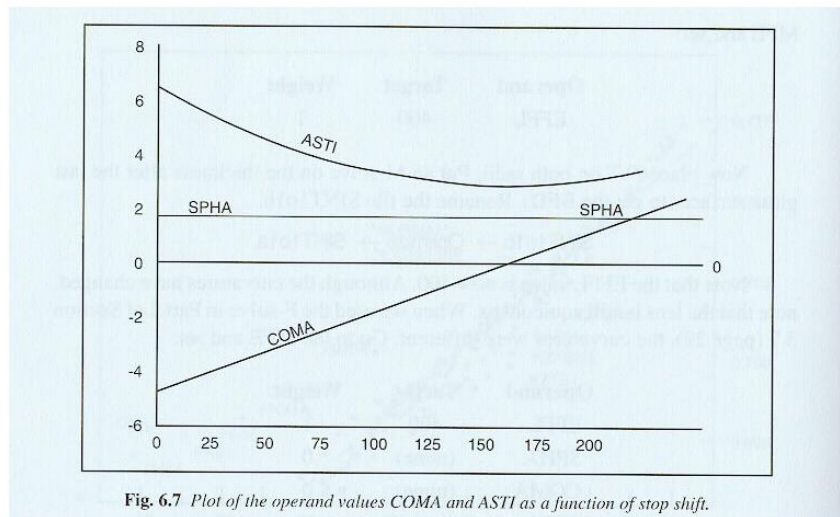
注意 EFFL 值现在是 400。尽管曲率改变了，但注意透镜还是对称凸透镜。当我们在 3.7 段第二部分使用 F-solve 时，曲率不同了。回到 MTF 设置：

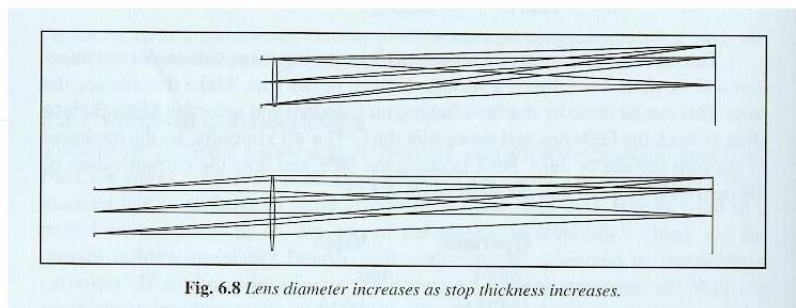
Operand	Target	Weight
EFFL	400	1
SPHA	(none)	0
COMA	(none)	0
ASTI	(none)	0

零权重表示我们仅仅追踪这些值。这里不做优化。在透镜前插入一个表面。定义这个表面为光阑。可以通过双击 **Standard** 然后选择 **Make Surface Stop** 实现。（核查 **GEN** 确定 **EPD=40**。）首先，让光阑表面的厚度为 0。点击 **MTF** 中的刷新，注意这些操作数的当前值。（记住视场角为 5° 。）

Operand	Value
EFFL	400
SPHA	1.713
COMA	-4.8702
ASTI	6.4049

像差的值以波长的单位给出。不要担心如果你现在不理解这些值得意思。这里我们该关心的事情是当光阑位置改变时会发生什么。注意：把透镜的口径设为浮动非常重要。在 **Semi-diameter** 栏内必须没有 **U**。现在我们将移动光阑远离透镜（通过每次给它的厚度 10-mm 的增量。）并监视像差值的变化。结果在图 6.7 画出。像预期的一样，球差一直为常量。彗差以线形改变，竟能通过 0 值。像散在整个范围内为抛物线，在彗差为 0 的位置处达到最小值。





	Operand	Value
光阑在 160mm	EFFL	400
	SPHA	1.713
	COMA	-0.07
	ASTI	2.94

注意透镜的口径从 40mm 增加到 68mm 多（如图 6.8）。现在让 Zemax 找到光阑的最佳位置。回到 SINT1o1a。去掉半径上的 V。把光阑厚度设为 V。在 MTF 内加入 TRAC[tools→default merit function{RMS/Spot Radius/Centroid}→OK]。重命名 WOLR1o1b。（注意：当你在 MTF 中加入 TRAC 时确认插入的行在其他的常驻操作数之下。你可以插入一个“BLNK”行在常驻操作数下面，选中这一行，然后插入 TRAC。）

WOLR1o1b→Optimize→WOLR1o1a

观察光阑的厚度。它现在的值为 161.35...与接近于我们在图中看到的值。

6.4 渥拉斯顿后景物镜

现在让我们使用优化功能来找到最佳像面，让所有透镜弯曲并让光阑位置移动。回到 WOLR1o1a。重新设置 V 在两个曲率半径。重命名 WOLR1o2b。

WOLR1o2b→Optimize→WOLR1o2a

这次运行，我们是在 WOLR1o1a 光阑移动后作为起始点的。让我们看看光阑厚度 0 作为起始

点时会发生什么。回到 WOLR1o1b。重新设置 V 在两个曲率半径。重命名 WOLR1o3b。

WOLR1o3b→Optimize→WOLR1o3a

现在我们比较这两个结果。透镜不再是对称凸透镜了。两组透镜的曲率有细微的差别。光阑的位置也不同。（注意：数据是在 ZEMAX 7.2 版本下得到的）

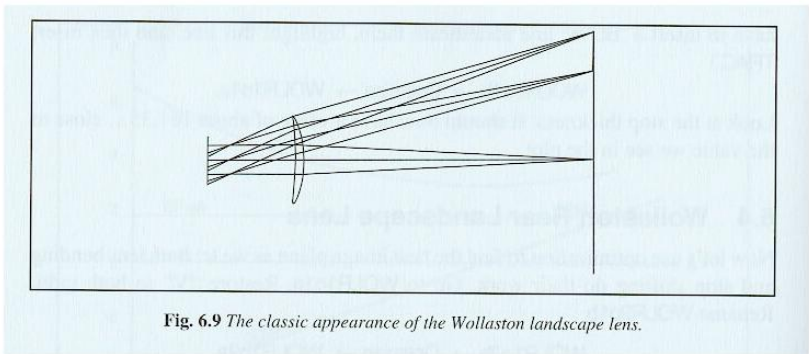
	(1o2a)	(1o2b)
PARAMETER	Value	Value
Stop at	163.821	163.9208
SPHA	1.9165	2.0156
COMA	-0.0297	-0.0307
ASTI	2.4126	2.1968

对于给定的孔径和视场通过透镜弯曲和光阑移动完成最佳 RMS 点阵优化，ZEMAX 允许稍微高的球差来降低彗差和像散。起始点也很重要。在这个例子中，当在光阑厚度为 0 开始优化时，我们得到稍好的结果。

经典的渥拉斯顿风景物镜外观是新月形的。我们能够通过增加我们这个物镜的视场来得到差不多的外观。回到 WOLR1o3b。把视场增加到 25°。我们还需要增加透镜的厚度到 12mm（为了使两表面的边缘不会彼此穿过。）。重命名为 WOLR1o4b。

WOLR1o4b→Optimize→WOLR1o4a

结果得到如图 6.9 所示的新月外形。



6.5 历史资料：威廉·渥拉斯顿(William Wollaston)

当我们浏览这些经典的镜头时，会适当说一些让这些镜头诞生的设计者的事情。我们刚讨论的后景物镜是威廉·渥拉斯顿设计的。渥拉斯顿（图 6.10 所示）于 1766 年出生在英国。1793 年他在剑桥大学取得医学学位但仅实习了几年。他真正感兴趣的是科学，尤其是化学。他发明了一个实用的方法提炼铂金从而致富。在光学，他是第一个观察太阳光谱黑线的人；建议用新月透镜制作眼镜；并发明了用新月透镜前加光阑（在 1812 年间）来对一定距离的物体成像用于观察和绘画。他的景物镜能比当时使用的双凸透镜提供更平的场。当 1839 年摄影技术兴起时，它和渥拉斯顿镜头成功的结合，持续了将近 60 年的时间。

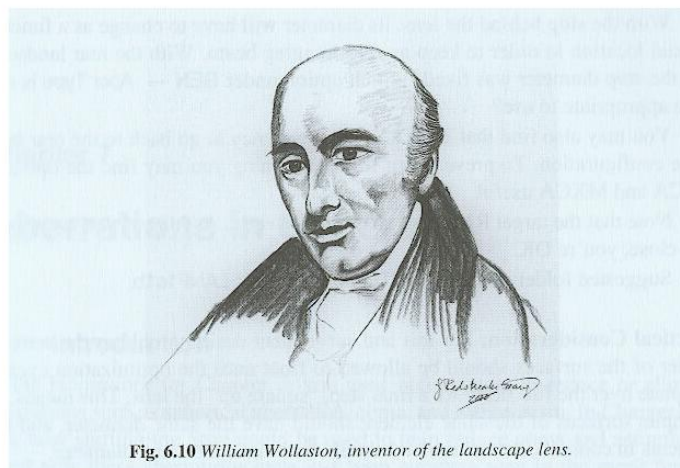


Fig. 6.10 William Wollaston, inventor of the landscape lens.

6.6 作业

前景物镜将是你使用 ZEMAX 的第一个真正镜头设计问题。玻璃的选取是设计过程中的一个重要的问题。对于一个选定的透镜类型，知道采用什么玻璃，意味着能不能达到规格所定的目标。这些知识通常是通过实践和错误得到的。镜头设计者将试着改变透镜系统中一个玻璃（或多个玻璃）来看是不是对传递函数有重大的提高。有 100 多种玻璃可供选择。多年以后，镜头设计者会有一种对给定的情形该选用什么玻璃的直觉。一个学生通过一学期的学习还不能有这种能力。因此，这本书课后作业的设计问题都是指定了特定玻璃的。但作业完成后，鼓励同学们采用其他的玻璃型号来看看结果，多次实践就会提高。

设计一个前景物镜：

$$\begin{array}{ll} \text{EFL}=100 & \lambda=0.587 \\ f/15 & \text{BK7} \\ \text{Field}=15^\circ = \overline{U} & t=4\text{mm} \end{array}$$

计算起始曲率半径由薄透镜光焦度公式得到（假定透镜是对称曲率半径）。把曲率半径输入

到 ZEMAX。弯曲透镜并移动光阑让像面达到最佳 RMS。（注意：点阵图设置：方形，质心，爱里斑）在 MFE 中使用 TRAC。
目标点大小：达到或超过：

Field	No DIS * RMS	DIS RMS
0°	23 μ m	18 μ m
10.5°	43	12
15°	65	20

DIS:虚像面（参考 30 第 8 段）

对于光阑在透镜后面，为了保证 f/15 的光圈，它的口径会以轴上位置函数的形式改变。对于后景物镜光阑大小是确定的。在 GEN→Aper Type 里选用哪个操作会好些？
你还会发现 ZEMAX 有想回到后景物镜外型的倾向，为了阻止这种情形发生，你会发现操作数 MNCA 和 MXCA 是有用的。
注意目标 RMS 点大小不是固定的。只要你的结果比较接近就行。
建议文件夹名称：FRONTLAN：文件名称：LANF1o1b。

练习意见：在这个和以后的设计问题中，表面的半口径必须设置为浮动，直到对所有视场优化完毕。作为最后一步，调整透镜，这是说，例如，同一元件的两表面应有一致的口径，两个元件胶合（像消色差物镜）应该有同样的口径。

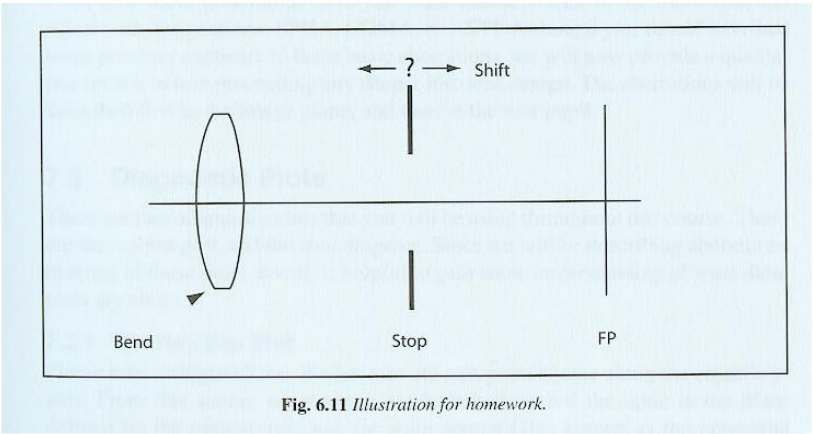


Fig. 6.11 Illustration for homework.