

steven:

ZEMAX软件培训教程

吴新民

Support@infotek.com.tw

课程说明

- 本次课程主要侧重于ZEMAX软件功能介绍和使用知识，不是光学理论或专题设计培训，所以关于应用光学的基础知识和光学设计的基本概念，这里一般不做介绍；
- 本次所培训的内容是根据最新版本的ZEMAX-EE所提供的基本功能；关于ZEMAX的一些深入功能和技巧，会在以后公司的高级培训课程中进行；
- 本powerpoints的内容包含3天的培训材料，所以根据具课程进展情况，有些内容会跳过或展开讲述；
- 此材料的版权为2003讯技光电科技（上海）有限公司。未经允许，请不要扩散或复印。

课程内容

- ZEMAX概述
- ZEMAX用户界面
- Solves
- Analysis
- Optimization
- Pick Up
- Doublet design
- Tolerancing
- Coordinate Breaks
- Multi-Configuration(Zoom lens design)
- Non-Sequential
- Glass Catalogs
- Plate Fitting
- Gaussian Beam Analysis

Some Useful References

- 天津大学张以谟主编〈应用光学〉
- 北京理工大学袁旭沧等编著〈光学设计〉
- 南京理工大学孙培家等〈光学设计〉
- Joseph M.Geary〈Introduction to Lens Design: With Practical ZEMAX Examples〉
- Robert E. Fischer etc.〈Optical System Design〉
- Warren Smith〈Modern Optical Engineering〉
- Gregory Hallock Smith〈Practical Computer-Aided Lens Design〉(On Zemax)

国内外光学设计软件情况

※国内情况:

- 北京理工大学(SOD), 南京理工大学等自编光学设计软件。

※国外情况:

- Optical Research Associates: Code V
- Lambda: OSLO等。

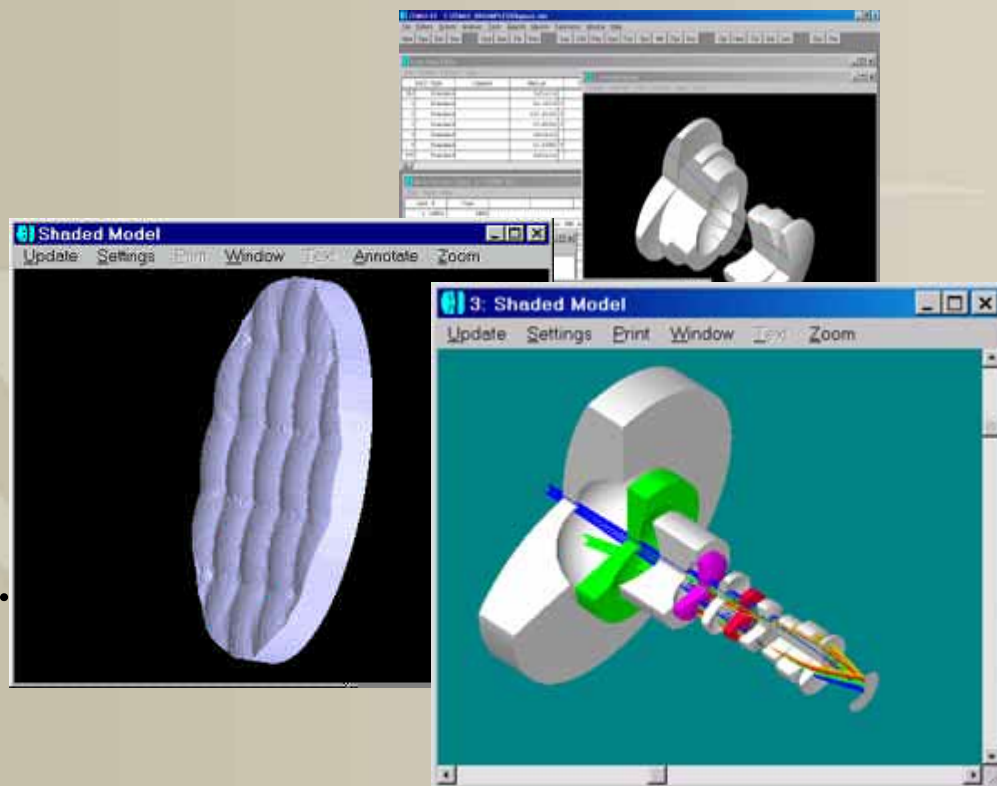
ZEMAX已经成为当今使用最普遍的光学设计软件

- ※ 市场占有率：80~85%
- ※ 全球已经销售了两万多套
- ※ 台湾已经销售600多套
- ※ 大陆已经有几百套，需要购买者越来越多，成为光学设计工程师的首选软件

市场应用

※ 应用范围:

- 传统光学系统、数码相机、内窥镜等光学镜头的设计
- DVD、VCD读写头
- 投影系统，背投电视
- 照明系统
- 变焦镜头、干涉仪
- LED封装
- Laser diode
- 光通信器件设计等等...



Zemax使用群

※NASA美国太空总署,Sandia 国家实验室, U.S.Army军队, HP,
Motorola...

※台湾:电子所,中科院,大学..., 扫描仪,相机,望远镜,投影机等制造商.

※大陆: 光学、光电研究所, 大学, 光学公司, 光学加工厂, 从事光学镜头、条形码、投影仪、背投影电视、光通信器件、VCD及DVD读写头等的设计的公司。

ZEMAX概述

ZEMAX简介 (I)

- ZEMAX 公司产品——光学镜头设计和光学系统分析软件
版本有二个等级：
 - * ZEMAX—SE(标准版)
 - * ZEMAX—EE(专业版)
- 每年有数次版本更新，可以到ZEMAX的网站或者讯技光电科技公司的网站上下载更新

www.zemax.com

www.infotek.com.tw

ZEMAX简介 (II)

- 界面友好，容易上手；资料丰富，既可以点选，又可以自定义；
- 可建立反射、折射、衍射及散射等光学模型；
- 可进行偏振、镀膜和温度、气压等方面的分析
- 具有强大的像质评价和分析功能；
- 丰富的资料库：镜头库、玻璃库、样板数据库等，
- 大部分窗口都提供在线帮助,方便随时获取相关功能的在线解释和
帮助。

系统要求

- WIN98 , NT , 2000 , XP
- 200Mb 以上的硬盘空间
- 最小的分辨率为：1024*768
- 一个并行口或者USB接口用来接KEY
- 64Mb以上内存；如果进行对象非常复杂、物理光学或散射和照明分析时，最低要求是256MB，最好是512Mb

What is ZEMAX?

- ZEMAX是一套光学系统设计和分析软件，
- ZEMAX用sequential和non-sequential的方法模拟refractive,reflective和diffractive光线追迹，
- ZEMAX用“surface”为sequential ray tracing建模；用“component”或object 为non-sequential ray tracing建模。

3种Ray Tracing方式的应用

- Purely sequential的应用：
 - *传统的镜头设计，大多数成像系统;
- Hybrid sequential/ non-sequential(aka NSC with ports)的应用：
 - *同时有sequential组件和non-sequential组件（如prism,pipe）的系统;如望远镜,
 - *用“ports”为光线进入和离开NS group的出入口;
- Purely non-sequential(aka NSC without ports)的应用：
 - *用于illumination, scattering, stray light analysis;
 - *不用“ports”。

Ray Tracing的比较

Sequential

以surface为对象建立模型
指定光线和面相交的顺序
光线与每个面只相交一次
光线不会分光
镜面反射
光线不能超过临界角
通光孔径外的光线必须渐晕
surface的位置由前一个面确定
每个面都有物空间和像空间
计算的光线少，计算速度快
可进行优化和公差分析

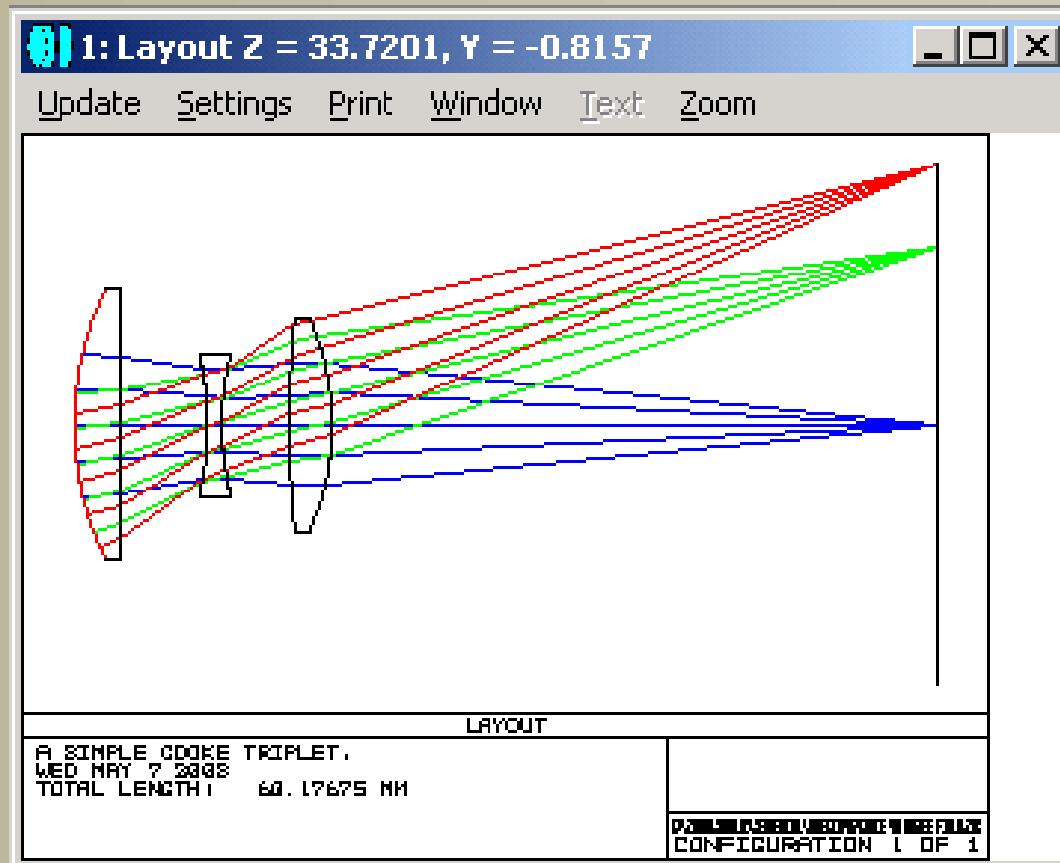
Non-sequential

以object为对象建立模型
不限制光线和面相交的顺序
光线与同一面（或物）可多次相交
光线会分裂
镜面反射和漫反射
可以是全反射
在object外的光线也进行追迹
object的位置由用全局坐标确定
所有空间是等价的
分析的光线多，计算速度慢
不能做优化和公差分析

Ray Tracing的3种方式 (I)

- (1) **Purely Sequential:** 用于传统的透镜成像系统设计;
- 以光学面 (surface) 为对象来构建光学系统模型;
 - 光线从物面开始 (常为surface 0)
 - 按光学面的顺序计算 (surface 0, 1, 2...), 对每个光学面只计算一次;
 - 每个面都有物空间和像空间;
 - 需要计算的光线少, 计算速度快;
 - 可进行analysis, Optimization及Tolerancing;

Sequential system例子

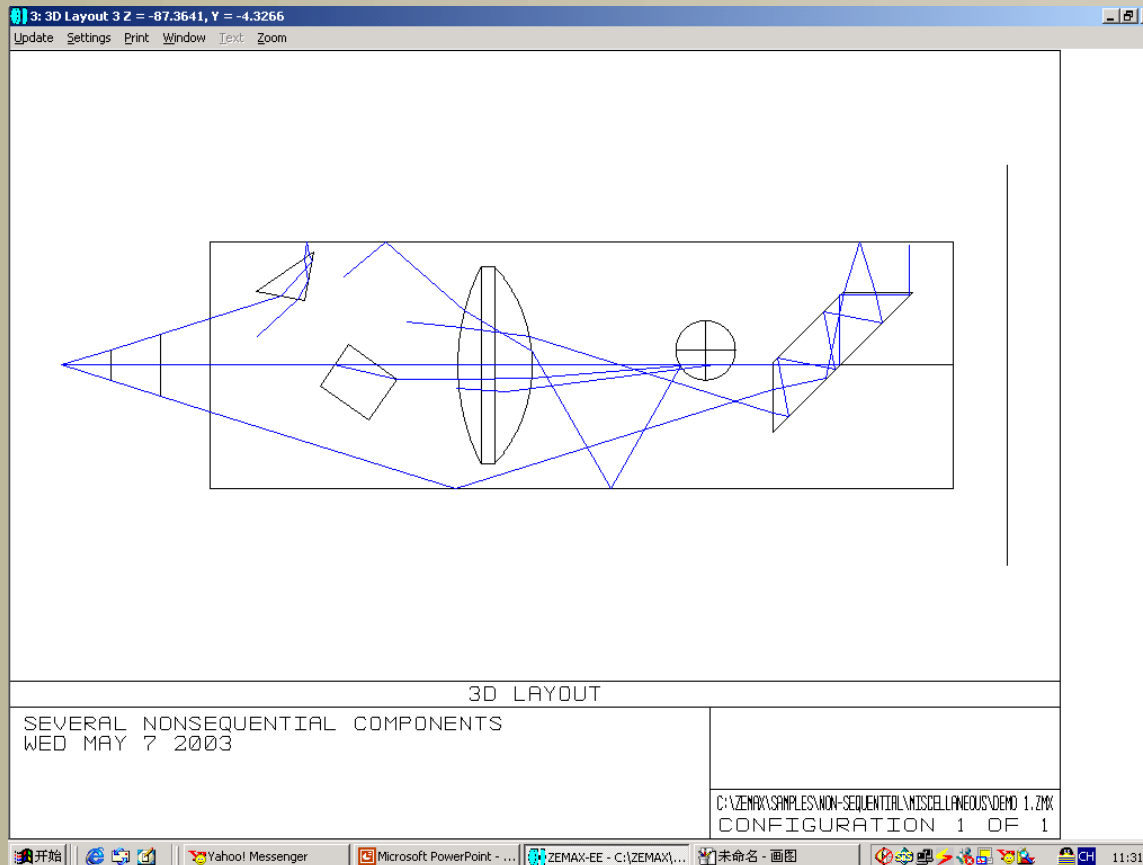


Ray Tracing的3种方式 (II)

(2) Hybrid sequential/non-sequential(aka NSC with ports)

- 所有object都是3D shell or solids; 用空间坐标系定义其位置;
- 光线从input port进入NS group; 从exit port离开NS group;
- 光线在NSC中一直追迹, 直到它遇到下列情况才终止:
 - *Nothing
 - *Exit port
 - *能量低于定义的阈值。
- 忽略NS group内的光源和探测器;
- 进入NS group的光线的特性, 由序列性的系统数据, 如视场位置和瞳的大小等决定。

NSC with ports system例子



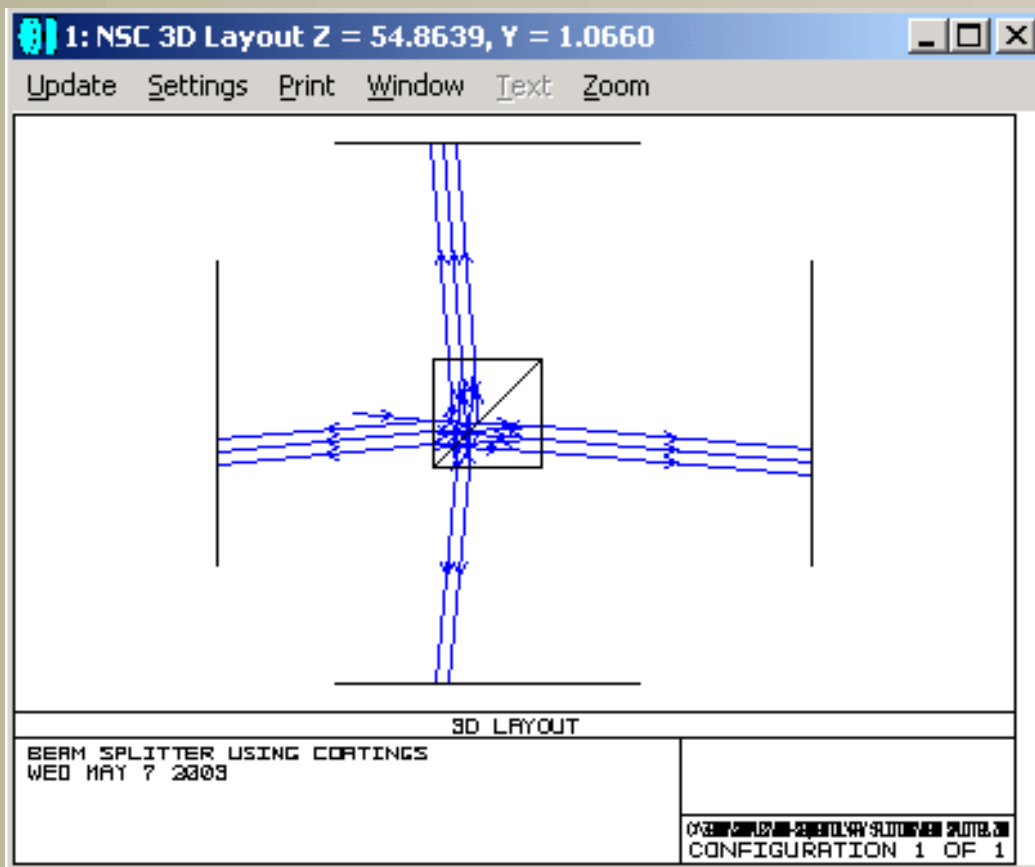
Ray Tracing的3种方式 (III)

(3) Purely Non-sequential (aka NSC without port)

- 所有object都是3D shell or solids;
- 每个object都在一个空间坐标系中定义了其特性;
- 需要定义光源的发光特性和位置, 定义detector收集光线;
- 光线一直追迹, 直到它遇到下列情况才终止:
 - *Nothing,
 - *能量低于定义的阈值。
- 计算时光学元件的相对位置由空间坐标确定; 对同一元件, 可同时进行穿透、反射、吸收及散射的特性计算;
- 无法作优化及公差分析;

这种情况下, 可以对光线进行分光, 散射, 衍射, 反射, 折射。

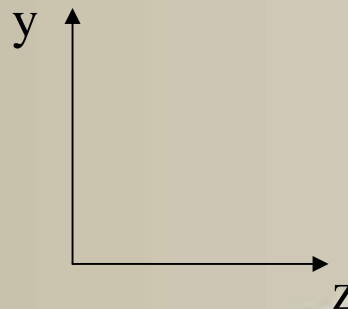
NSC without ports system例子



ZEMAX的坐标系

- Local coordinate system

所有面的位置是由局域坐标确定的



- Global coordinate system

所有面或物件的位置是由空间坐标系确定的

ZEMAX用户界面

ZEMAX用户界面类型

ZEMAX有4种主要类型的用户界面：

- Editors:定义和编辑光学面和其他数据；
- Graphic windows: 显示图形数据；
- Text windows: 显示文本数据；
- Dialog boxes: 编辑和回顾其他窗口或系统的数据，或者报告错误信息等。

ZEMAX Editors界面

- Lens data editor: lens data编辑表格，包括surface type, radius, thickness, glass,etc.
- Merit function editor:优化时，定义和编辑merit function的窗口；
- Multi-Configuration editor: 为变焦镜头和其它多重结构系统定义多重结构参数；
- Tolerance Data editor: 定义和编辑公差数据；
- Extra Data editor:定义surface data的附加数据；
- Non-sequential component editor:定义和编辑NSC sources, objects, detectors。

ZEMAX Editors

Lens Data Editor
 Edit Solves Options Help

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic	Par
OBJ	Standard		Infinity	10.000000		0.000000	0.000000	
STO	Standard		Infinity	10.000000	S	3.144855	0.000000	
2	Standard		Infinity	10.000000	LF7 S	6.289709	0.000000	
3	NonSeqComp		Infinity	-		0.000000	U	0.000000
4	Standard		Infinity	10.000000	-	35.000000	U	0.000000
IMA	Standard		Infinity			31.367065	0.000000	

Merit Function Editor: 9.000000E+009
 Edit Tools Help

Oper #	Type	Target	We
1 (DMFS)	DMFS		
2 (BLNK)	BLNK	Default merit function: RMS wavefront centroid CQ 3 rings 6 arms	
3 (BLNK)	BLNK	No default air thickness boundary constraints.	
4 (BLNK)	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.	

Multi-Configuration Editor
 Edit Solves Tools Help

Active	Config 1*
1: MOFF	0

Tolerance Data Editor
 Edit Tools Help

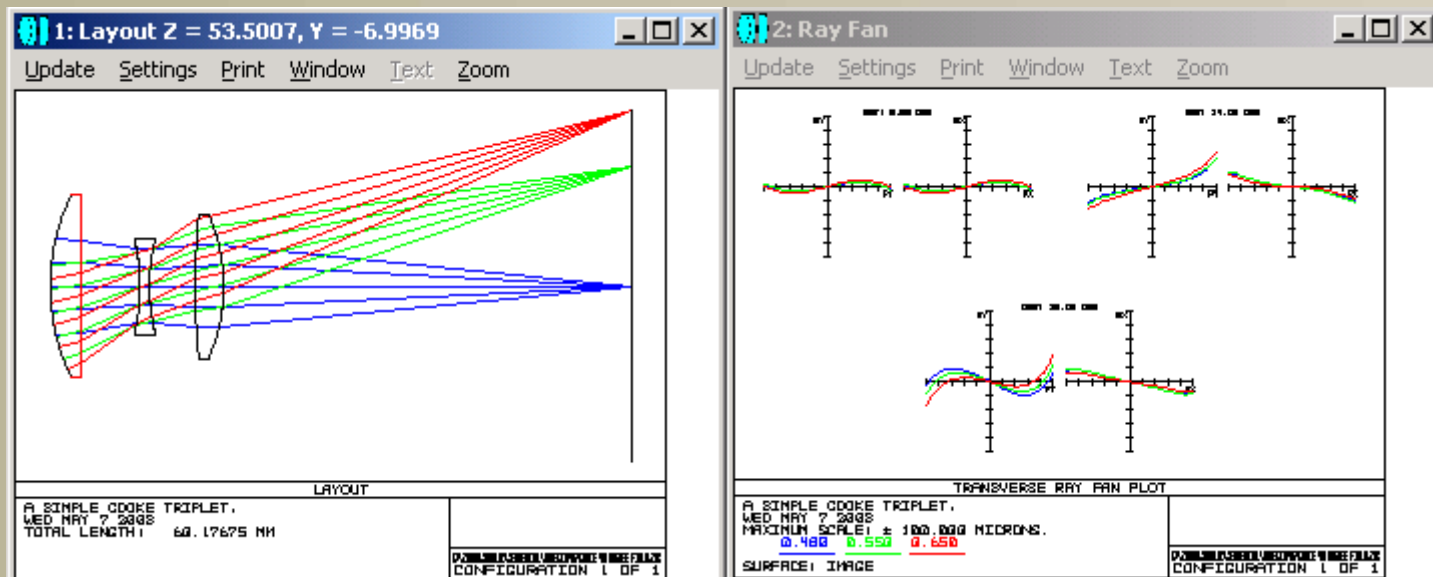
Oper #	Type	Surf	Code	-	Nominal	Min	
1 (COMP)	COMP	4	0	-	-500000000.000000	5000	
2 (TWAV)	TWAV	-	-	-	0.632800		
3 (TFRN)	TFRN	2	-	-	-1.000000		
4 (TTHI)	TTHI	1	3	-	10.000000	-0.200000	
5 (TTHI)	TTHI	2	3	-	10.000000	-0.200000	

Graphic and Text 界面

- 有些功能（如layout）只支持图形，有些只支持文本（如Seidel像差系数），有的都支持（如fan plot）；
- 如果二者都支持，一般先给出图形输出，如果需要显示text的内容，需要点一下菜单栏中的“Text”；

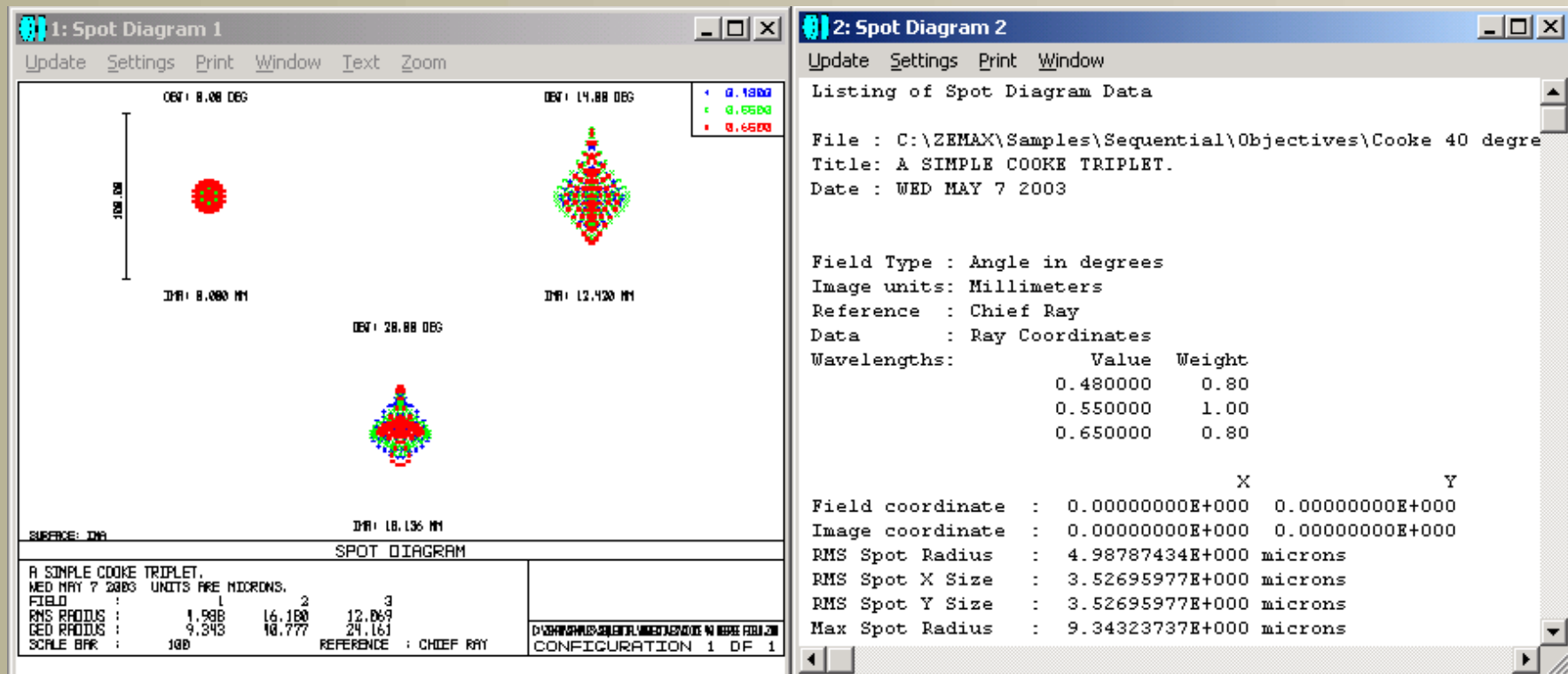
Graphic and Text windows例子

大部分图形窗口都同时提供文本信息。



Graphic and Text windows例子

点Text菜单栏，可以看到图形窗口中的文本信息。



Graphics windows菜单功能

Update: 更新窗口中的数据;

Setting: 设置窗口的属性;

Print: 打印窗口的内容;

Windows:

- Annotate: 往图形上加lines,boxes,text;
- Copy clipboard:将内容拷贝到剪切板中;
- Export:将内容转换为Metafile, JPG, BMP文件保存;
- Lock:锁定窗口;
- Clone:Clone窗口;
- Aspect ratio:设置窗口的长宽比;
- Active cursor:对图形窗口显示鼠标所指位置的数据;
- Configuration:选择要显示哪个结构的数据;
- Overlay: 不同图形重叠显示;

Text windows菜单功能

Text:产生图形所对应的文本数据;

Zoom:对图形放大和缩小控制

Update:更新窗口中的数据;

Setting: 设置窗口的属性;

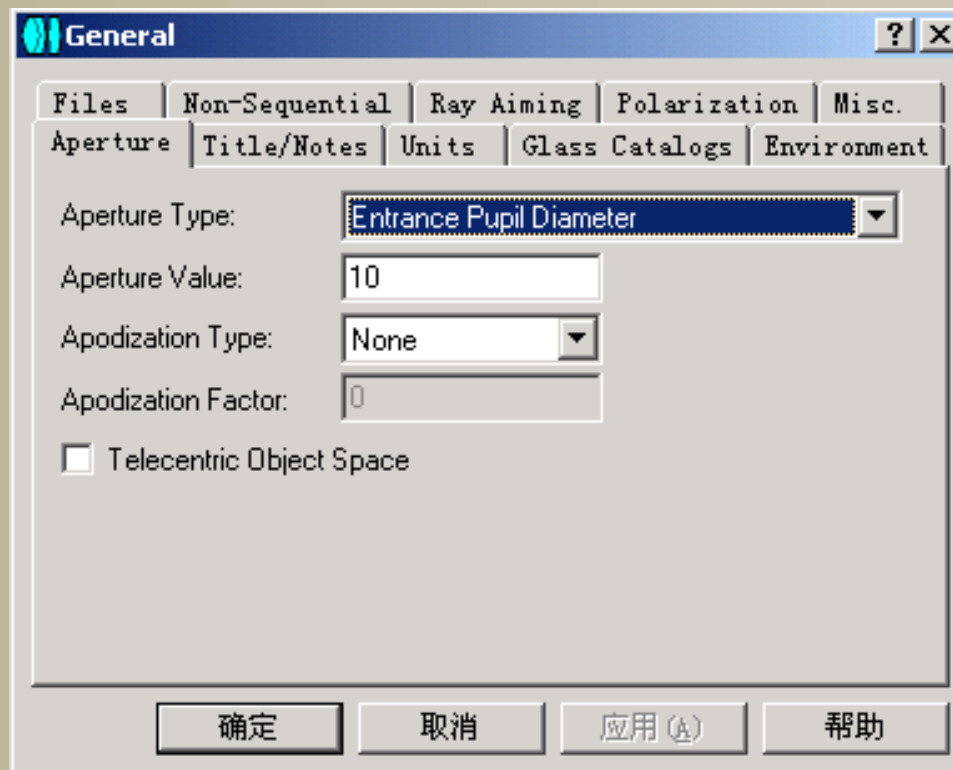
Print: 打印窗口的内容;

Windows:

- Copy clipboard:将内容拷贝到剪切板中;
- Save: 保存ASCII TXT文件;
- Lock:锁定窗口;
- Clone:Clone窗口;
- Configuration:有多重结构时, 选择要显示哪个结构的数据;

Dialog boxes

ZEMAX的大部分图形和文本窗口都包含有设置对话框。



数据输出

输出到剪贴板，可以供其它windows应用程序使用，如Excel等；
输出到CAD程序：支持DXF，IGES，STEP，SAT，STL格式。

DXF:

- 因为不是标准格式，对其支持比较差一些；
- 只有在wireframe的设定中才支持。

IGES，STEP，SAT，STL:

- 真正的CAD标准；
- 可以输出3D solids；
- 可以输出为lines；
- 在Tool菜单栏中。

Session file的概念

- **Session file** : 在保存文件时, 如果选择**Session file**, 则它包括 **lens file**, 及所有图形和文本窗口, **editors**, 它们在屏幕上的大小和位置, 及每个窗口的设置。此时, 除了一个**ZMX**文件以外, 还有一个**SES**文件。

光学系统模型的建立

Step1: System data specification:

- *System aperture
- *Fied point
- *Wavelength

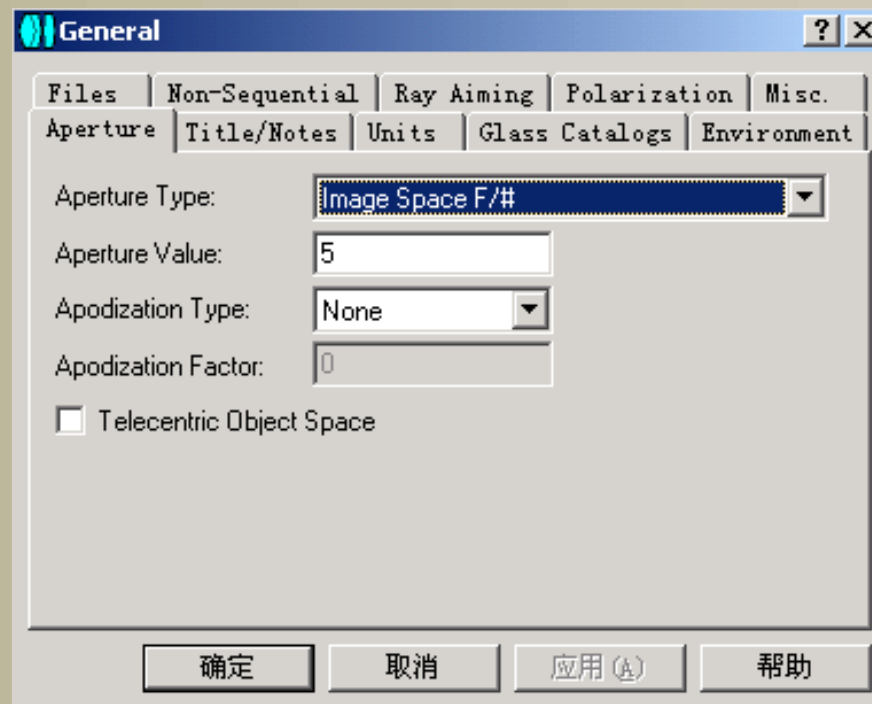
Step2: Lens data editor:

- *surface data
- *Thickness
- *Glass
- *Other parameters

Lens Data

The system aperture

- 它是一个很重要的参数，系统入瞳的大小，它决定光学系统在物空间收集多少光线。



System aperture types

- Entrance Pupil Diameter(EPD):直接指定入瞳的大小;
- Image Space F/#:无限共轭像空间近轴F数 (f/D ,物距为无穷大);
- Object Space Numerical Aperture: 物空间边缘光线的数值孔径 $n\sin\theta$ (物距为有限远);
- Float by Size: EPD的大小由光栏的半径决定;
- Paraxial working F/#:像空间中定义的共轭近轴F数 ($1/2n\tan\theta$), 忽略像差;
- Object Cone Angle:物空间边缘光线的半角, 最大可以达到90度 (物距为有限远)。

Field points

ZEMAX常常用点光源定义视场或物的大小:

- 定义了点光源以后, 可以建立扩展光源的模型;
- 对每个系统最多可以定义12个视场点。

ZEMAX支持4种不同视场形式:

- **Field angle:**投影到入瞳上XZ和YZ平面上时, 主光线与Z轴的夹角。大多用在无限共轭系统。
- **Object height:**物面上X, Y高度。大多用在有限共轭系统。
(注: 如果物面为曲面, 则X, Y坐标包含Z坐标)
- **Paraxial Image height:**像面上的近轴像高。用于需要固定像的大小的设计中。(只用于近轴光学系统中)
- **Real image height:**像面上实际像高。用于需要固定frame size的设计中(如camera lenses)。

Field points 示例

Field Data

Angle (Deg) Paraxial Image Height
 Object Height Real Image Height

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0	7	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 3	0	10	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 4	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 5	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 6	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 7	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 8	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 9	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 10	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 11	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 12	0	0	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Wavelengths

- ZEMAX对每个系统最多允许定义12个波长。并且必须指定主波长，根据不同波长的重要性，权重可以不同（权重只影响点列图的计算）。
- 波长的单位为微米。

Use	Wavelength (microns)	Weight	Primary
<input checked="" type="checkbox"/>	1 0.48613270	1	<input type="radio"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	2 0.58756180	1	<input checked="" type="radio"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	3 0.65627250	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	4 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	5 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	6 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	7 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	8 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	9 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	10 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	11 0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	12 0.55000000	1	<input type="radio"/>

Select -> F, d, C (Visible)

Lens data的组成

Sequential lens data-Surface data:

- 面的序号;
- 面的结构数据;
- 透镜的孔径;
- 波长;
- 视场。

进行优化时,还需要:

- 变量;
- 优化函数。

For NSC without port system,还需要:

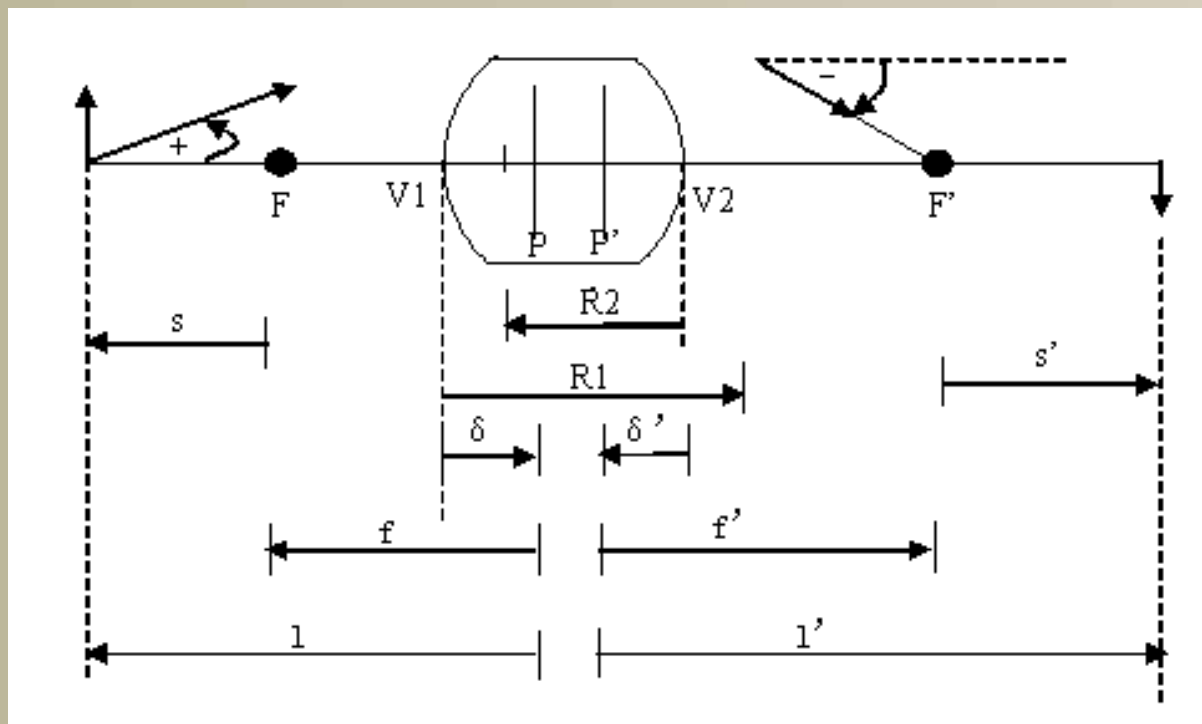
- 所有object的结构参数和位置参数;
- 所有source和detector的特性参数和位置参数;
- 波长。

Surface data的组成

- The radius of curvature:面的曲率半径，根据符号规则确定符号；
- The thickness of the surface:到下个面的相对距离，满足符号规则（用local坐标系）；
- The glass type of the surface:玻璃牌号，或折射率和色散系数（如果是空气，则为空格；如果为反射镜，则为Mirror）；
- The semi-diameter of the surface(optional): 面的孔径；
- Other data (parameter or extra data) :描述面形的参数。

Surface data的符号规则

- 镜头数据 (Lens Data) : 曲率半径、厚度、材质和其他参数。
各量符号规定:



符号规则

- Thickness: 沿+z方向（从左到右）为正，反之为负
- Ray angle: 从光轴开始逆时针为正，反之为负
- Radius of curvature (R): 如果曲率中心在面的顶点右边，则曲率半径为正；反之为负

Surface Type

- (1) 提供了近60种的光学曲面面形。主要类型有：平面、球面、标准二次曲面、非球面、光锥面、轮胎面、折射率渐变面、二元光学面、光栅(固定周期和变周期)、全息衍射元件、Fresnel透镜、波带片等。
- (2) 还提供了User Defined Surface。用户只需要按照它的语法规定，用C++语言编写DLL文件与ZEMAX相连接就可以建立自己需要的面形。

Standard

- 球面的球心在光轴上，顶点在当前轴上。矢高坐标为：

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}$$

- 参数：曲率 c ，二次曲面系数 k
- 二次曲面系数 k :
 - $k < -1$ 双曲面（2个焦点）
 - $k = -1$ 抛物面（无球差）
 - $-1 < k < 0$ 椭圆
 - $k > 1$ 扁椭圆

Asphere

- Even Asphere

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6 + \alpha_4r^8 + \alpha_5r^{10} + \alpha_6r^{12} + \alpha_7r^{14} + \alpha_8r^{16}.$$

- 参数：标准面参数，偶次非球面系数。
- Odd Asphere

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \beta_1r^1 + \beta_2r^2 + \beta_3r^3 + \beta_4r^4 + \beta_5r^5 + \beta_6r^6 + \beta_7r^7 + \beta_8r^8.$$

- 参数：标准面参数，奇次非球面系数。

Paraxial

- **Paraxial** 是理想的薄透镜，它的形状是一个平面。用于需要输出准直光的系统的分析和优化。
- 参数：focal length, OPD mode
 - (1) mode=0: 小像差系统 (wave < 5 wave)
 - (2) mode=1: 光束有像差且 F/# 低 (即 fast beam)，或者系统是非共轴的
- Paraxial XY: 类似 Paraxial，只是 X, Y 方向的光焦度不同。它用的 OPD mode=1。

Mode=1 的计算速度要比 mode=0 慢得多。

Toroidal

- 轮胎面：由Y-Z平面内的一条曲线，然后绕着平行于Y轴并与Z轴相交的一个轴旋转而得到。

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + \alpha_1y^2 + \alpha_2y^4 + \alpha_3y^6 + \alpha_4y^8 + \alpha_5y^{10} + \alpha_6y^{12} + \alpha_7y^{14} .$$

- R=0可以建模X方向的圆柱面。
- 如果要建立Y方向的圆柱面，可以用Biconic面。

ABCD Surface

- 是光学系统“black box”建模的方法。如果你有一个透镜或者一个光学系统，不知道它的每一个元件的参数，用这个仍然可以知道模型的行为。

$$\begin{bmatrix} x' \\ \omega'_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & D_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \omega \end{bmatrix}$$

- 8个参数： $A_x, B_x, C_x, D_x, A_y, B_y, C_y, D_y$ 。
- 可以用来建立二个（一个x方向，一个y方向）的二阶矩阵对穿过surface的光线进行变换。因为没有可靠的方法来计算经过ABCD的位相，所以如果透镜中存在ABCD面，则不支持任何需要对OPD fans, MFT和Zernike系数的计算。

Grating

- **Diffraction Grating** : 栅线为直线并均匀分布的光栅, 栅线平行于 local x-axis; 可以为透射或反射型的。
- **Toroidal Grating** : 衍射光栅放在toroidal surface上; 可以为透射或反射型的。
- **Elliptical Grating** : 基底是带有非球面多项式的椭圆, 周期可变; 栅线平行于local x-axis; 可以为透射或反射型的。
- **Variable Line Space Grating** : 用于掠入射光谱仪中。这个光栅是用来设计在一个凹的球面上成像。会聚光束照射到光栅上用于反射。栅线平行于local x轴, 栅线在x-z 面内。只有当光栅用于反射的时候才测试这种特性 (玻璃类型必须为: **Mirror**) 。

Fresnel surface

- Fresnel: 实际Fresnel透镜的近似，基底为平面。不适合用于灯塔的Fresnel 透镜的建模，
- Extended Fresnel：基底为二次曲面。
- Cylinder Fresnel：基底为扩展的非球面圆柱面。
- Generalized Fresnel: (XE, EE) 表示最一般情况的Fresnel面。主要用于平面的基底上带有faceted surface的情况。

Jones Matrix

- 用于定义任意的偏振组件，只考虑偏振的影响。面形为平面。如 1/2波片、1/4波片。
- X、Y方向1/4波片：

$$\begin{bmatrix} (0, 1) & (0, 0) \\ (0, 0) & (1, 0) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (1, 0) & (0, 0) \\ (0, 0) & (0, 1) \end{bmatrix}$$

- X、Y方向1/2波片：

$$\begin{bmatrix} (-1, 0) & (0, 0) \\ (0, 0) & (1, 0) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (1, 0) & (0, 0) \\ (0, 0) & (-1, 0) \end{bmatrix}$$

Hologram

- 用来构建光学结构的hologram，由形成全息图的二束光的结构点的坐标定义。面形可以是：Plane, Spherical, Conical。可以为透射或反射型的。
- Hologram 1: 形成全息图的二束光同时都是会聚或发散的；
- Hologram 2: 形成全息图的二束光一个会聚，一个发散；

Gradient

- 折射率渐变面。可以模拟各种不同的折射率渐变面。
- Gradient 1~10，其折射率的表达式不同。

Coordinate Break

- 是一个虚拟的平面，根据当前的系统定义一个新的坐标系。
- 需要六个参数来描述：x-decenter, y-decenter（单位：lens units），tilt about x,y,z(单位：度)，order(0或非0):
 - (1)order=0: x-decenter \rightarrow y-decenter \rightarrow local z tilt \rightarrow local y tilt \rightarrow local x tilt
 - (2)order \neq 0: tilt x \rightarrow tilt y \rightarrow tilt z \rightarrow x-decenter \rightarrow y-decenter。

Non-Sequential Component

- 非序列性光线追迹面。主要用于混合光线追迹模式。
- 用Non-Sequential Component Editor编辑这个面的组成。

User Defined

- 用C或者C++编写，并且编译成DLL文件，由ZEMAX调用；
- 提供30个典型面形的例子作参考(也可以直接使用)：标准面、透镜阵列、柱透镜阵列、光栅、色散GRIN元件、渐变折射率面、MEMS等。

Variable parameters

- 在进行优化设计时，需要设置变量，ZEMAX会调整这些变量，以找到最佳设计结果。
- 变量可以是任何光学及结构参量，包括radii, thicknesses, indices, V numbers, partial dispersions, conic constants, tilt angles, 甚至 fields and wavelengths。

Merit functions

- 优化函数是用来定义优化控制目标项目。它包括设计目标，边界条件和计算结果的总结。
- 在优化过程中，用merit function的值来评价一个系统的优劣。
- Merit function由optimization operands组成，ZEMAX提供了200多个这样的操作数，涵盖了各种目标控制条件。

Tolerancing

- ZEMAX可以对光学面的参数和群组的参数进行公差分析。它提供了二种公差分析模式：
 - (1)sensitivity: 给定结构参数的公差范围，计算公差对评价标准的影响，
 - (2)inverse sensitivity: 给出评价标准量的允许变化范围，反算出各个光学面结构参数的允许公差容限。

结果报告

- 可以给出各种数据的结果报告，可以是图形、曲线或表格的形式：

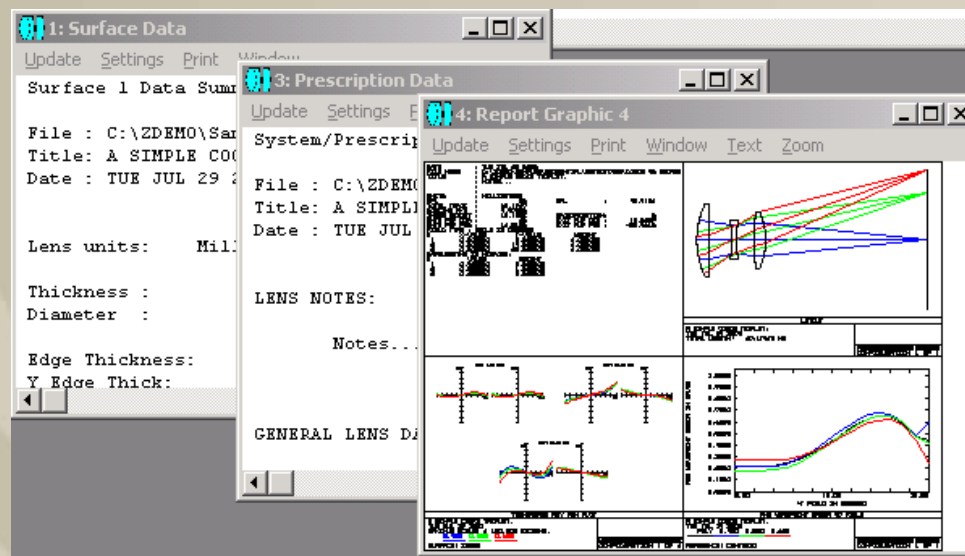
(1)surface data

(2)system data

(3)prescription data

(4)report graphic

- 可以输出零件图、固体图或网格图。
- 可以输出SAT/STEP/IGES等文件格式。



其他

- 包含有很多知名公司的玻璃材料库，
- 可以进行镀膜分析，可以编辑薄膜，
- 可以进行热分析，
- 可以进行偏振光计算，
- 可以进行物理光学分析和计算，
- 可以进行样板比对。

快速建立一个Singlet练习

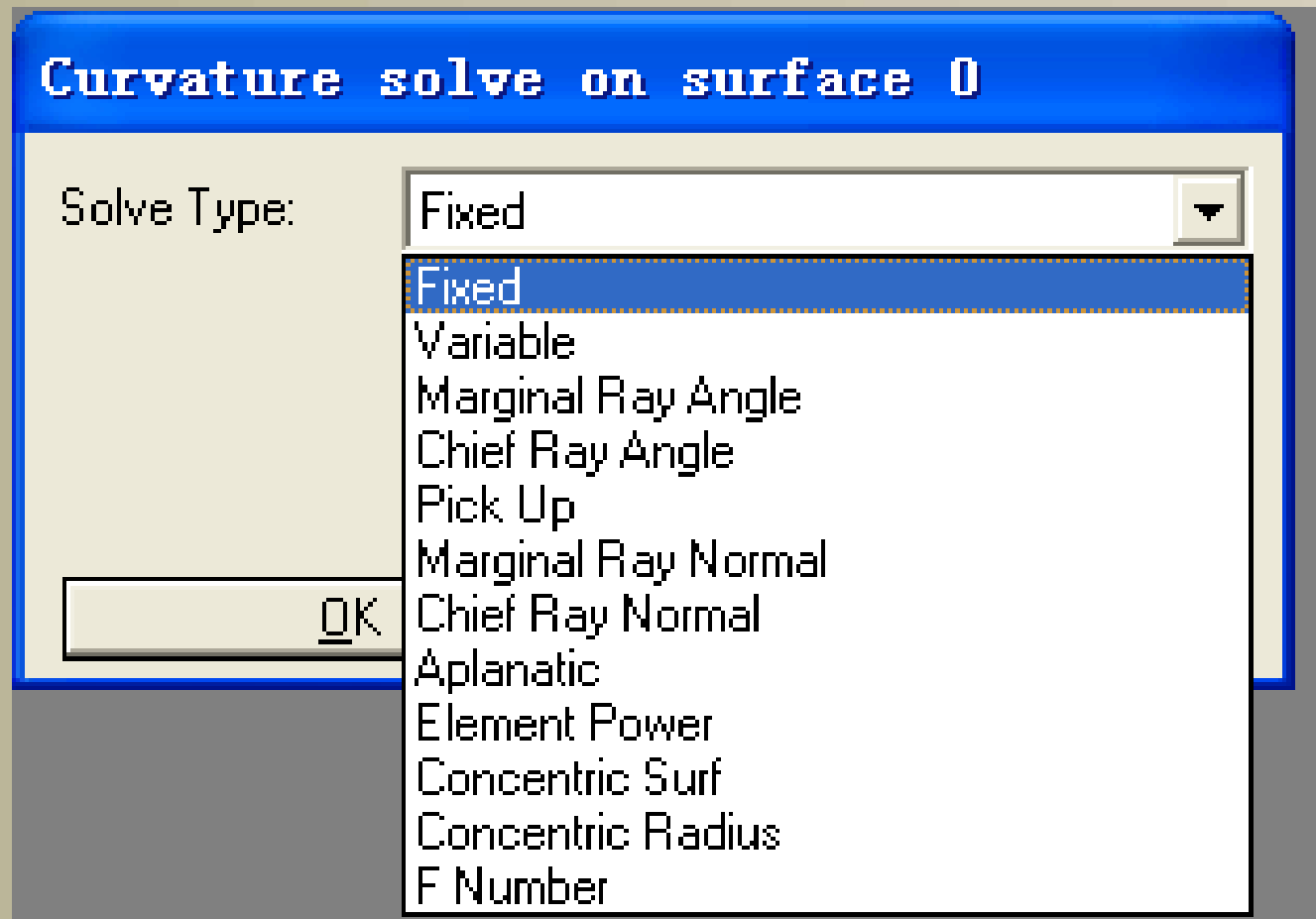
- 目的：练习如何建立初始结构、设定视场和工作波长。
- 题目：建立一个单透镜，入瞳直径为20mm，二个面的曲率半径分别为100mm,-100mm，中心厚度为4mm
- 视场0, 7, 10度
- 波长：可见光
- 玻璃材料：BK7
- 可以在透镜前面放一个stop，前后移动它，看它对各种像差的影响情况

Solves

什么是 solves?

- Solves 是ZEMAX中可以主动调整特定值的功能。可以为 curvatures, thicknesses, glasses, semi-diameters, conics, and parameters等参数指定solve。
- Solves的设置：在希望放置solve功能的栏中点右键或双击左键
- Solves的应用：
 - Maintaining F/#:用MRA或F/# curvature solve;
 - Maintaining paraxial focus:用MRH;
 - Maintaining edge thickness;
 - Linking values together:pickup solve;
 - Holding a distance between surfaces:position solve。

Curvature solves



Marginal ray angle or F/#

- Marginal ray angle $\theta_m(r/f)$ 决定 F/#:

$$F/\# = 1/2NA = 1/2n \sin(\theta_m)$$

如果系统为 slow (即 F/# 大, 如 F/10 或更慢) 时,

$$F/\# = 1/2n \sin(\theta_m) = 1/(2n\theta)$$

MRA solve 可以调整任何面 (一般是最后一个 glass-air 面) 的曲率半径, 在优化时, 保持 F/# 固定不变。 $\theta_m(r/f)$, -号表示是会聚光, +号表示是发散光), 可以控制透镜的有效焦距 f (EFL);

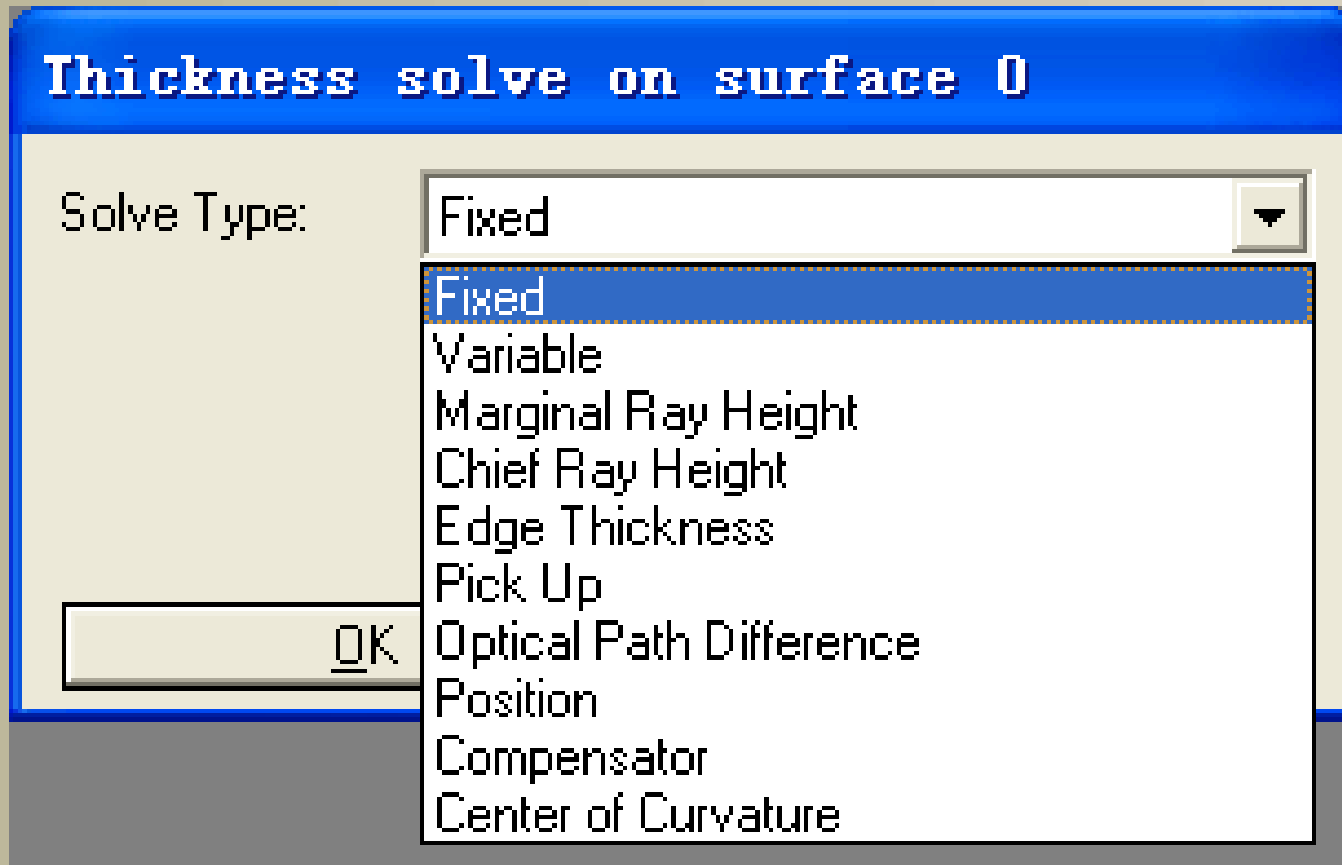
Curvature solves

- Chief ray angle:控制主光线的角度;
- Pick up:指定前面某个面,使当前面的曲率半径和指定的面保持确定关系;
- Marginal ray normal:使光学面与近轴边缘光线垂直,也叫image-centered surface。产生没有球差或彗差的光学面;
- Chief ray normal:使光学面与近轴主光线垂直,也叫pupil-centered surface。产生没有彗差、像散或畸变的光学面;
- Alplanatic(齐明的):使光学面对近轴边缘光线齐明的(消球差)。产生没有球差、彗差或像散的等光程光学面。

Curvature solves

- **Element power:** 光学系统的光焦度 (n/f)。控制指定的透镜的光焦度，可以控制有效焦距；需放在透镜的第二个面上；
- **Concentric with surface:** 控制面的曲率，使这个面的曲率中心落在前面某个面上；
- **Concentric with radius:** 控制面的曲率，使此面的中心与指定的面（前面）的中心为同一点；
- **F/#(F number):** 控制面的曲率，使从这个面出射的边缘光线角为 $-1/2F$ (F 即为 D/f ， D 为入瞳直径， f 为有效焦距)。可以控制系统的有效焦距。

Thickness solves



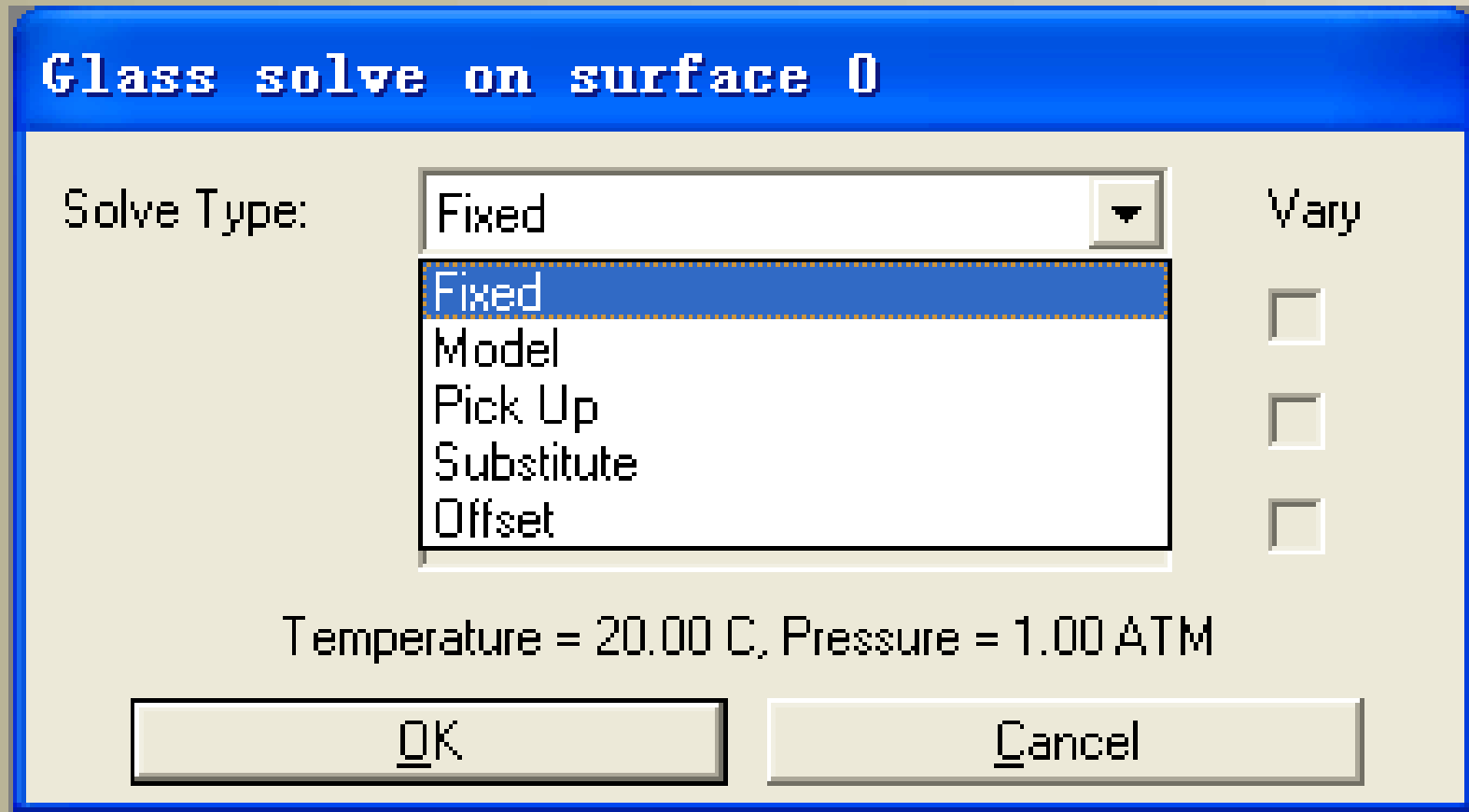
Thickness solves

- **Marginal ray height:**常用控制近轴边缘光线在像面上的高度，使像面处在近轴焦点上；可以定位像平面，或得到后节距；
- **Chief ray height:**近轴主光线高度。可以定位pupil plane，也可以将光学面移到光瞳面上；（应用：1、可以将参考面固定在pupil上，2、定位入、出瞳）；
- **Edge thickness:**控制二个面之间的距离，可以对应某个口径处为指定的值。可以避免边缘厚度为负或边缘太尖锐；
- **Pick up:** 使这个面的thickness值随指定的面按一定规律变化；（主要用于：double pass system, endoscopes, relay lens等包含多个相同元件的系统中）；

Thickness solves

- **Optical path difference:**调整thickness, 使指定光瞳坐标处的光程差维持一个指定的值; 例如: 在焦点上, 边缘光线和主光线的光程差相等, 可以在像面前面的一个面的厚度处设置OPD Solve。
- **Position:**使这个面到指定参考面的距离(厚度的总和)保持为定值。在变焦镜头设计中, 可以控制它的某一部分保持固定的长度。也可以约束整个透镜的长度。
- **Compensator:**与position非常类似, 显示的是所要控制的厚度与参考面厚度之差。表达式为: $T=S-R$ 。S为二个面的厚度之和, R为参考面的厚度。参考面必须在前面。
- **Center of Curvature:**调整thickness的值, 使后面一个面处在前面某个面的曲率中心上。

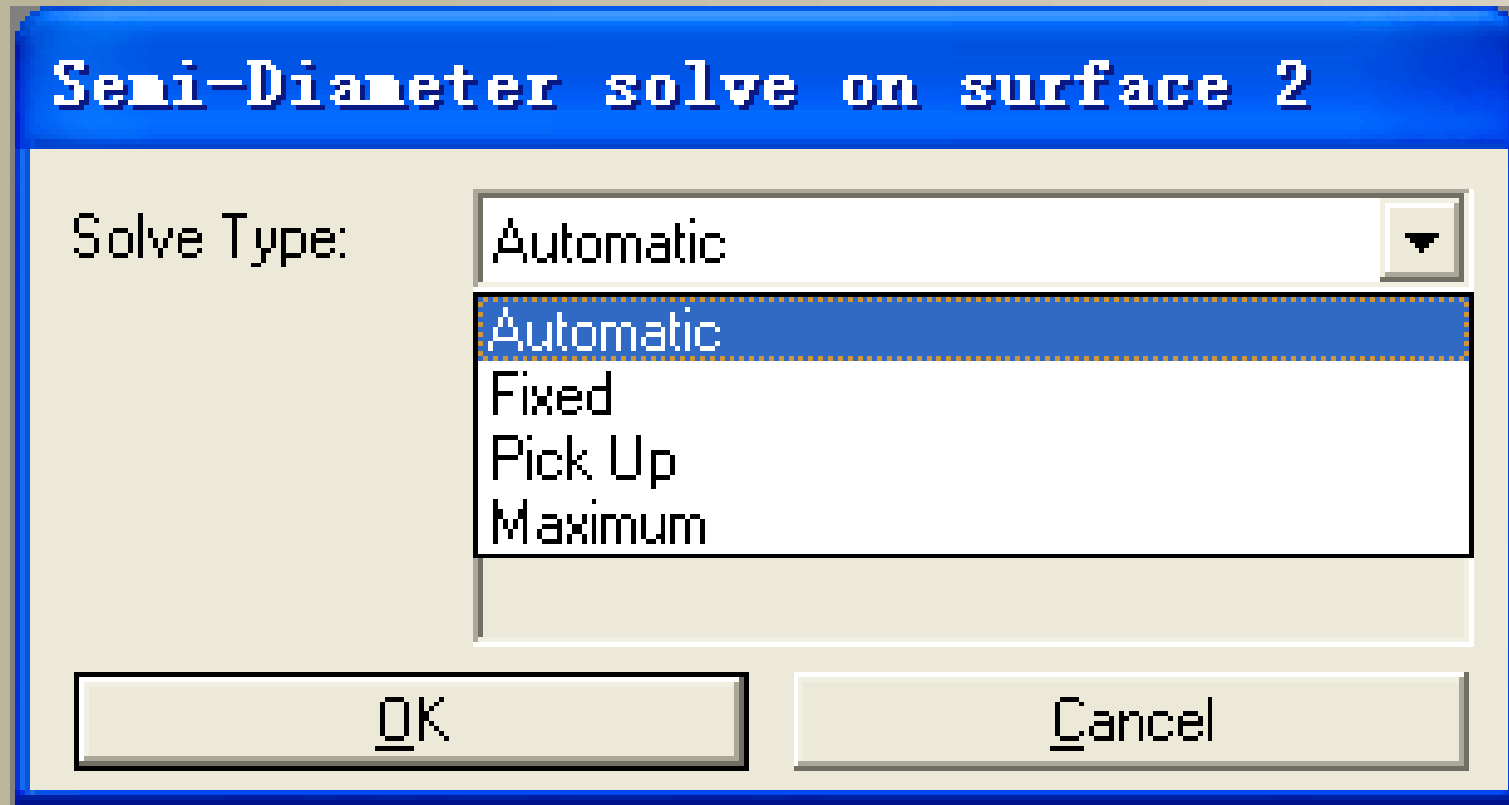
Glass solves



Glass solves

- **Model:** 用于玻璃的优化。用三个参数： d 光的折射率、Abbe数和部分色散项。只能用于可见光，可能得到不存在的玻璃；(不常用)
- **Pick up:** 随某个指定的面一起变化；
- **Substitute:** 若设置为这个，则在优化过程中，global optimization算法允许改变玻璃的类型。它更容易且可靠。在优化时，用hammer优化算法查找合适的玻璃。
- **Offset:** 允许在折射率或者Abbe数上增加一个小的偏移量。用于公差计算。

Semi-Diameter solves



Semi-Diameter solves

- **Automatic:** 根据入瞳自动调整孔径大小
- **Fixed:** 输入为固定的值
- **Pick up**
- **Maximum:** 在multiple configuration中，计算所有结构中的半径值，然后使用最大的一个值。

其它 solves

- Conic, Parameters也可以设置solve, 但一般只有Fixed, Variable和Pick up三种类型。
- Coord break的Parameters可以设置chief ray的求解类型。只用于coordinate break面的前4个参数。

Solve使用建议

- Solve的计算是从第1个面到像面顺序进行的，对参数计算的顺序是：curvature, thickness, glass, semi-diameter, conic, parameter;
- 因为curvature和thickness的solve会影响入瞳的位置，所以不允许将依赖于光线追迹的solve放在光栏的前面（如marginal ray height）；
- Solve是高效的，在设计过程中尽可能用它来代替优化变量控制一些参数。

Solve感受练习

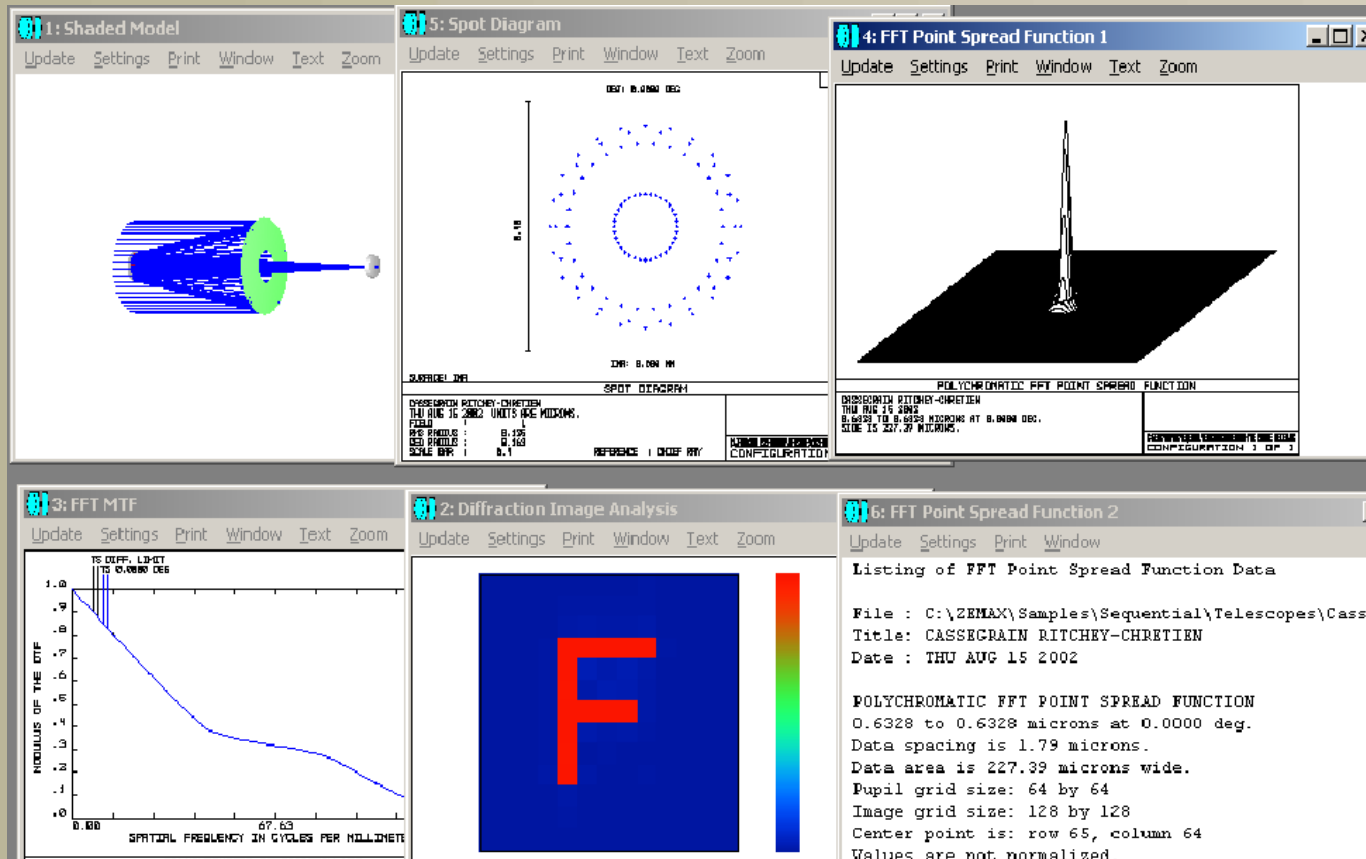
- 用Solve求解的方法，将前面设计的单透镜的焦距控制为100mm，
- 用Solve将像面移到焦点上。

Analysis

像质评价与分析

- ※ ZEMAX提供了丰富的像质评价指标，评价小像差系统的波像差、圆内能量集中度；评价大像差系统的点列图、弥散圆；MTF、PSF;几何像差评价方法。
- ※可以给出Seidel和ZERNIKE像差系数
- ※可以进行扩展光源的分析
- ※像质评价结果表现形式多种多样，既有各种直观的图形表示方法，也有详细的数据报表。

像质评价报告结果示例



像质评价指标

- ※Fans(扇形图, 垂轴几何像差等)
- ※Spot Diagram(几何点列图, 弥散斑)
- ※MTF (调制传递函数)
- ※PSF (点扩展函数)
- ※Wavefront(波像差)
- ※能量分析
- ※Miscellaneous(杂项, 几何像差)
- ※像差系数
- ※扩展光源分析

Layout	▶
Fans	▶
Spot Diagrams	▶
MTF	▶
PSF	▶
Wavefront	▶
Surface	▶
RMS	▶
Encircled Energy	▶
Illumination	▶
Image Analysis	▶
Biocular Analysis	▶
Miscellaneous	▶
Aberration Coefficients	▶
Calculations	▶
Gradient Index	▶
Universal Plot	▶
Polarization	▶
Coatings	▶
Physical Optics	▶

Layout

- 2D,3D: 系统的2维和3维图。如果系统不是旋转对称的, 则只能用3D layout;
- Wireframe: 3维网格图;
- Shaded Model,Solid Model: 3维固体图。solid model plot 对一些自定义的apertures or obscurations不能正确画出地surface;
- Zemax Element Drawing: 用于车间加工的工程图。可以是surface, singlet, doublet;
- ISO Element Drawing: 按照ISO 10110标准的零件图。可以是surface, singlet, doublet。
- NSC Layout

Fan

- **Ray Aberration:** 子午和弧矢垂轴像差，它全面反映了细光束和宽光束的成像质量。它是光线在理想像面上的交点和主光线在理想像面上交点间的距离，**可以看出理想像面上像的最大弥散范围**。横坐标是归一化入瞳坐标。
- **Optical Path:** 实际光线和主光线的OPD之差(波像差)。OPD vs. 归一化出瞳坐标曲线图；只能对光阑后的面进行计算。
- **Pupil Aberration:** 光阑面上实际光线交点和轴上主波长近轴光线交点坐标之差与近轴光阑半径之比。光阑面上入瞳畸变 vs. 归一化入瞳坐标。主要用来**指导是否要用ray aiming**。

Spot Diagrams

- **Standard:** 显示不同视场的Spot Diagram, 给出GEO 和RMS spot size 及Airy Disk;
- **Through focus:** 离焦的spot diagram。可以估测像散、最佳像面或者焦深;
- **Full Field:** 所有视场的点列图。可以确认二个很近的像点是否能够被分辨;
- **Matrix, Configuration Matrix:** 同时列出不同结构的所有视场的点列图。可用于区分像差中与波长有关的分量。

FFT MTF

- FFT MTF:用FFT算法计算所有视场的衍射MTF(OPD<10wave)。计算时假定在出瞳上的光线分布是均匀的。截止频率为 $1/(\lambda F/\#)=1/2 \lambda n \sin \theta$;
- FFT Through Focus MTF:在指定空间频率下, 离焦的 FFT MTF vs. focus shift;
- FFT Surface MTF: 用3D surface, contour, grey scale 或Color map显示 MTF数据;
- FFT MTF vs. Field:以图的形式显示FFT MTF vs. Field position;
- FFT MTF map:在一个矩形视场区域内, 计算不同视场点的FFT MTF。

Huygens MTF

- Huygens MTF: 计算Huygens PSF的FFT。适用于出瞳存在严重的畸变，如系统中有大的离轴反向镜时。在出瞳上的光线分布不均匀，比FFT MTF更普遍使用。
- Huygens Through Focus MTF: vs. focus shift: 离焦的Huygens MTF的变化曲线；
- Huygens Surface MTF: 用MTF的surface, grey scale, false color 或者 contour plot显示数据。

Geometric MTF

- Geometric MFT: 是衍射MTF的近似。适用于大像差 ($OPD > 10$ 个波长)、低空间频率的系统, 或者不接近衍射极限的系统, 计算几何MTF;
- Geometric Through Focus MFT: 在指定的空间频率下, 离焦的MTF分布。
- Geometric MFT vs. Field: MTF随视场的分布曲线。
- Geometric MTF Map: MTF vs. X, Y视场。X, Y坐标表示二个方向的视场, 用伪彩色表示MTF随视场的分布情况。

三种算法中, Huygens算法最通用。

PSF

- FFT PSF:用FFT的计算衍射PSF。它是出瞳上波前复振幅的FFT，计算系统中单个点光源通过系统所成衍射像的强度，计算速度快。
- FFT PSF Cross Section: FFT PST剖面图；
- FFT Line/Edge Spread: FFT线/刀口扩散函数；
- Huygens PSF: 根据Huygens原理，用Huygens子波直接积分的方法计算。认为波面上每个点是一个理想的点光源，即子波（wavelet）。唯一不足是计算速度慢。
- Huygens PSF Cross Section: Huygens PST剖面图。

Huygens PSF最通用。

Wavefront

- Wavefront Map:波前图。
- Interferogram（用干涉条纹分析）：产生和显示干涉图；
Interferometers可以用二个结构，然后计算它们的干涉图。
- Foucault Analysis(傅科刀口分析)：产生和显示Foucault刀口阴影图。
模拟焦点附近任何位置上x或者y方向的刀口，然后计算由刀口渐晕光束回到近场的阴影图。

Surface

- **Surface Sag:** 在XY平面上均匀网格点上计算的，显示z方向的sag值。
- **Surface Phase:** 显示该面加到通过的光线的位相改变情况，单位为周期。

RMS

- RMS vs. Field: RMS radial, x, and y spot radius, RMS wavefront error, or Strehl ratio对视场角的变化曲线;
- RMS vs. Wavelength: RMS radial, x, and y spot radius, RMS wavefront error, or Strehl ratio对波长的变化曲线;
- RMS vs. Focus: RMS radial, x, and y spot radius, RMS wavefront error, or Strehl ratio对焦点位置变化的曲线。

Encircled energy

- Diffraction: 点物的像面上，某个半径范围内包含的能量占整个能量的百分比 vs. 到主光线或像的质心的距离；
- Geometric: 用光线-像面交点数目的方法计算园内能量；
- Line/Edge Response: 计算线物或者边缘物（半无限大平面）的像的光强分布图的截面图；
- Extended Source: 用扩展光源分析。
- 不适用于接近衍射极限的系统

Illumination

- **Relative Illumination:** 入瞳为均匀的Lambertian照明时，出瞳上相对照度 vs. radial y field 曲线;
- **Vignetting Plot :** 渐晕光线比例 vs. 视场角曲线;
- **Illumination XY scan :** 扩展光源，沿像面截面照度的分布曲线;
- **Illumination 2D surface :** 在一个二维面上计算扩展光源的照度分布的像。

Image Analysis

- **Image Analysis:** 扩展光源成像分析。主要目的是显示物通过光学系统后的直观像。这个物可以是自定义，也可以是标准的24-bit彩色BMP或JPEG文件，可以是任何形状。
 - 有三类image analysis:
 - (1) Geometric using IMA file:适合看大视场的效果和大像差系统，如畸变；
 - (2) Geometric using BMP file:同（1）
 - (3) Diffraction using IMA file:适合看小视场和中等像差的系统效果，如外形边缘的衍射模糊。
- 可以估算多模光纤的耦合效率。

Image Analysis

- **Geometric Image Analysis:** 可以对扩展光源建模、分析光学系统分辨率、表示所成像的物的外貌及直观地看到像的旋转情况；用特殊的IMA or BIM文件。
- **Geometric bitmap Image Analysis:** 用RGB bitmap文件作光源，产生RGB彩色像。用几何光线追迹；
- **Diffraction Image Analysis:** 基于Fourier光学，用OTF计算扩展光源的像的外观。OTF不变；这种方法考虑有限通带和其它在像面上与衍射有关效应。
- **Extended Diffraction Image Analysis:** 用OTF计算扩展光源的像的外观。像面上不同视场上的OTF不同。目前还在研发阶段

Miscellaneous

- Field Curvature: 不同视场的场曲曲线; (S,T曲线之间的横向距离就是象散);
- Distortion: 不同视场的畸变曲线;
- Grid Distortion: 网格畸变图;

场曲和畸变只对旋转对称系统、且像面为平面时才有效。

- Footprint Diagram : 足迹图分析。光线在不同面上的分布情况图;
- Longitudinal Aberration: 纵向像差, 即球差。适于旋转对称系统。
- Lateral Color : 横向色差, 即垂轴色差(或放大率色差) Vs. 视场。仅用于旋转对称系统。
- Chromatic Focal Shift: 轴向色差。查看后节距随波长的变化情况。

Aberration coefficients

- Seidel Coefficients: 显示每个面的Seidel系数, 包括总的, 横向的, 纵向的波像差的系数; **只对全部由standard面构成的系统有效。**
- Zernike Fringe Coefficients: 用条纹多项式表示的Zernike系数, 共37项;
- Zernike Standard Coefficients: 正交的Zernike coefficients, 共28项;
- Zernike Annular Coefficients: 正交的Zernike coefficients, 共22项;

INTERRELATIONSHIP OF ABERRATION COEFFICIENTS

Name	Seidel	Wave	Description	Transverse	Longitudinal
Spherical	S_1	$\frac{S_1}{8}$	Spherical	$-\frac{S_1}{2n'u'}$	$\frac{S_1}{2n'u'^2}$
Coma	S_2	$\frac{S_2}{2}$	Sagittal	$-\frac{S_2}{2n'u'}$	$\frac{S_2}{2n'u'^2}$
			Tangential	$-\frac{3S_2}{2n'u'}$	$\frac{3S_2}{2n'u'^2}$
Astigmatism	S_3	$\frac{S_3}{2}$	From tangential to sagittal foci	$-\frac{S_3}{n'u'}$	$\frac{S_3}{n'u'^2}$
Field Curvature	S_4	$\frac{S_4}{4}$	Gaussian to Petzval	$-\frac{S_4}{2n'u'}$	$\frac{S_4}{2n'u'^2}$
	$S_3 + S_4$	$\frac{S_3 + S_4}{4}$	Gaussian to sagittal	$-\frac{(S_3 + S_4)}{2n'u'}$	$\frac{S_3 + S_4}{2n'u'^2}$
	$2S_3 + S_4$	$\frac{2S_3 + S_4}{4}$	Gaussian to medial	$-\frac{(2S_3 + S_4)}{2n'u'}$	$\frac{2S_3 + S_4}{2n'u'^2}$
	$3S_3 + S_4$	$\frac{3S_3 + S_4}{4}$	Gaussian to tangential	$-\frac{(3S_3 + S_4)}{2n'u'}$	$\frac{3S_3 + S_4}{2n'u'^2}$
Distortion	S_5	$\frac{S_5}{2}$	Distortion	$-\frac{S_5}{2n'u'}$	$\frac{S_5}{2n'u'^2}$
Axial Color	C_L	$\frac{C_L}{2}$	Chromatic aberrations are measured between the extreme defined wavelengths, referenced to the selected wavelength.	$\frac{C_L}{n'u'}$	$\frac{C_L}{n'u'^2}$
Lateral Color	C_T	C_T		$\frac{C_T}{n'u'}$	$\frac{C_T}{n'u'^2}$

Calculations

- **Ray Trace:** 单根近轴和实际光线追迹时，各个面上的交点处光线数据（出射方向余弦、角的正切、近轴边缘光线和主光线的夹角）；
- **Fiber Coupling Efficiency:** 计算单模光纤耦合系统的耦合效率。基于二根光纤或单根光纤的模型
- **YNI Contributions:** 拉赫不变量。每个面上的近轴YNI（Y：近轴像高；N：折射率，I：入射角）值；
- **Sag Table**：所选面的不同处的surface sag(z坐标)。给出最佳拟合球面的数据及偏差，可以确定一个面的最大非球面偏差，在镜头制造时有用。只考虑y坐标，所以对非旋转对称系统会无意义。
- **Cardinal Points**：基点。给出所选择的面范围内的子系统，对应波长的焦面、主（反主）平面、节（反节）平面。

Glass and Gradient Index

- Dispersion Diagram : 玻璃色散曲线。折射率 vs. 波长；可以检查输入材料的数据是否正确；
- Glass Map: 根据折射率和Abbe数画出的玻璃分布图；
- Int. Transmission vs. Wavelength: 玻璃透过率曲线；
- GRIN Profile: gradient index 面沿轴向折射率的分布曲线；
- Gradium Profile : 不同材料的 Gradium 面沿轴向折射率的分布曲线。

Universal Plot

- 定制：优化操作数vs.系统、面或多重结构参数曲线。

Polarization

- Polarization Ray Trace: 计算指定光线在各个面上的偏振数据;
- Polarization pupil map: 显示光瞳上偏振状态的变化情况; 不同面上偏振椭圆 vs. 光瞳位置图;
- Transmission: 指定偏振光线在各个面上的透射率及总光学系统的总透射率; **以主光线为参考**
- Phase Aberration: 计算偏振引起的光学系统的位相像差, 主要是电介质折射和导体及电介质的反射引起的。 **以主光线为参考**
- Transmission Fan: 对不同视场和波长, 透过率 vs. 光瞳上弧矢或子午光瞳像差。可以确定光瞳上透过率对视场和波长的变化情况。

Coatings

- **Reflection:**指定面上，不同入射角和波长时，反射光线的电场的S，P分量及其平均偏振强度系数曲线；
- **Transmission:**指定面上，不同入射角和波长时，透射光线的电场的S，P分量及其平均偏振强度系数曲线；
- **Absorption:**指定面上，不同入射角和波长时，吸收光线的电场的S，P分量及其平均偏振强度系数曲线；
- **Diattenuation:** 反射R和透射T的二次衰减对入射角和波长的关系曲线；
- **Phase:** 反射或者透射光线的S和P偏振的位相对入射角和波长的关系曲线；
- **Retardance:**计算指定面的位相延迟。

Optimization

内容提要

Optimization概述

Damped least squares

Constraints

Default Merit functions

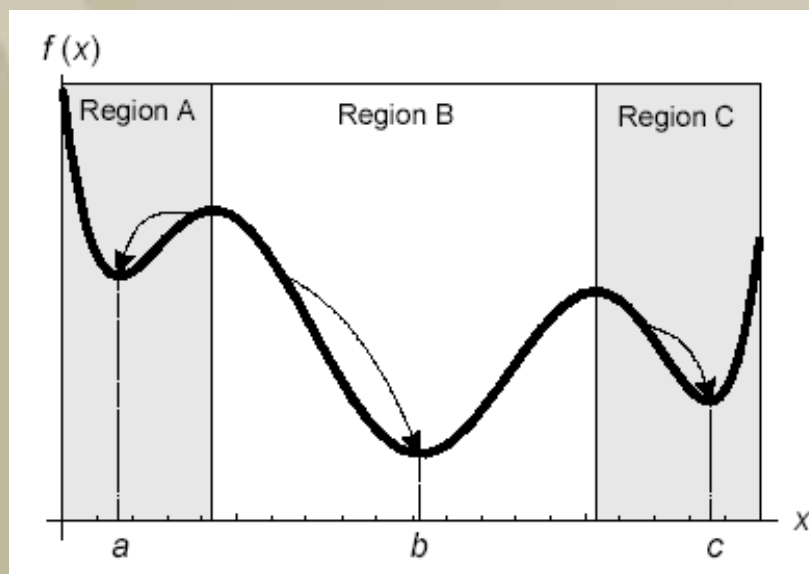
Operands

Optimization概述

- optimization是ZEMAX最重要的功能之一。
- optimization是通过改变光学系统中的结构参数（变量）的值，提高系统的成像质量。这些变量可以是 surface curvatures, element and air-space thicknesses, tilt angles, etc.
- 用Operands定义Merit function，通过比较给定光学系统和满足所有设计要求的系统的MF值，来评价系统的好坏。
- 一般用迭代（iterative）的方法，为变量选定一个起始点和一种优化算法，迭代地改变变量的值，以找出最小的MF值。

Local Optimization

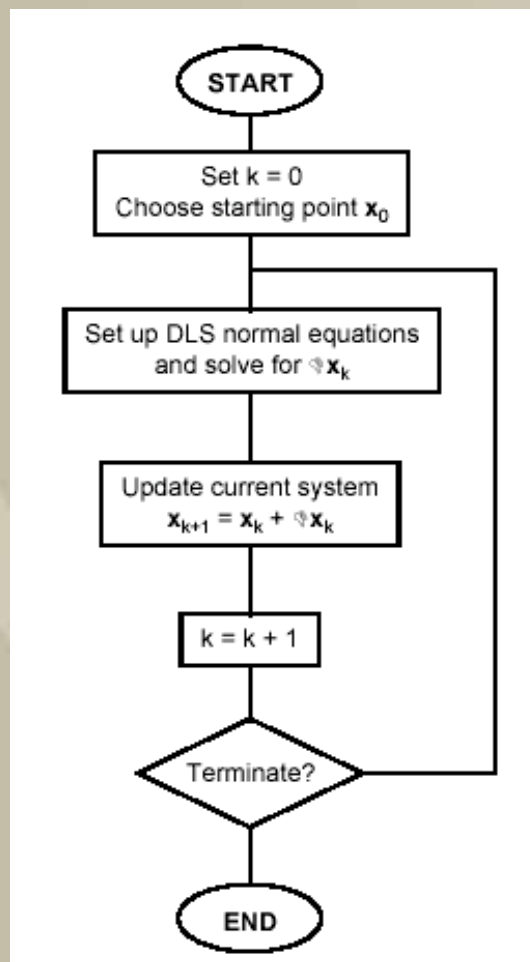
- 这种近似与初始点的选择有关：如果起始点选在Region A or Region C, 则可以在 $x = a$ or $x = c$ 到达 local 最小值,而不是在 $x = b$ 处的 global 最小值。



Local VS. Global Optimization

- **Local optimization:** 从给定的起始点，找到能够达到的最佳设计；上图中的a,b,c都是Local最佳设计值；
- **Global optimization:** 在一定的范围内找到最佳设计。上图中只有b是Global 最佳设计值。

Optimization过程



Damped Least Squares (DLS)

- DLS算法是所有光学设计软件中的基本优化算法。

假定Merit function定义为如下形式:

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i},$$

式中W为操作数的权重的绝对值，V为当前值，T是目标值，下标i是操作数的号码 (row number in the spreadsheet).

目标：找出x使MF的值最小。

Constraints

要约束某个量，可以有三种方法：

- **Solves:** 可以精确地对一些近轴特性进行控制。如在镜头的最后一个面设置axial ray angle solve为-0.1，则可以使 f -number保持常数 5；
- 在 Merit function用操作数控制变量的范围:在Merit function中增加operand，控制某个量的最大值或最小值。如厚度 >10 ；
- **Constraint operands:** 控制Operand，使控制的量为定义的精确数值。

Common constraints

- Lens 要有一定的size, cost, weight
- Edge和center thickness必须为正
- Minimum number of elements desired
- 加工制造尽可能简单
- 尽可能用便宜的材料

Default Merit functions

Default Merit Function

Optimization Function and Reference

RMS Wavefront Centroid

Pupil Integration Method

Gaussian Quadrature Rectangular Array

Rings: 3 Grid: 4 x 4

Arms: 6 Delete Vignetted

Thickness Boundary Values

Glass Min: 0 Max: 1000 Edge: 0

Air: Min: 0 Max: 1000 Edge: 0

Assume Axial Symmetry Start At: 1

Ignore Lateral Color Relative X Wgt: 1.0000

Overall Weight: 1.0000

OK Cancel Save Load Reset Help

Default Merit functions

支持20多个不同的Default Merit functions:

- Optimization type: RMS or Peak-To-Valley
- Data type: Wavefront, spot radius, spot x, spot y, or spot x plus spot y
- Reference point: Centroid , Chief Ray or Mean
- Pupil integration method: Gaussian Quadrature or Rectangular Array
- 上面的优化函数可以自由组合。

Gaussian Quadrature: 几乎所有的情况下都用GQ, 因为它比其它方法精确得多, 而且用的光线的数目也很少; **不能有渐晕系数。**

Rectangular Array: GQ的唯一缺点是不能用在带孔的光学系统中, 这时候只有用RA。RA算法的优点是能够精确计算优化函数中的渐晕效应。

Default Merit functions

Optimization type: 系统缺省的优化类型:

- 1) RMS (common use): 常用; 使像差的RMS最小,
- 2) PTV (rare use): 如, 如果所有的光线需要落在Fiber或detector的一个园形区域内, 这时 Peak-To-Valley (PTV)会更好。它使像差的PTV范围最小。

Data type: 系统给出的构建评价函数的数据类型:

- 1) Wavefront: 波像差 (wavefront < 2waves)
- 2) Spot Radius(弥散圆半径) (wavefront > 2waves)
- 3) Spot X (x方向弥散圆的大小)
- 4) Spot Y (y方向弥散圆的大小)
- 5) Spot X and Y (x和y方向弥散圆的大小)

Default Merit functions

Reference point: 缺省优化时RMS和PTV的参考点。

- 1) Centroid (质心): 常用（特别是对波像差优化时）；出现彗差时，用质心作参考点更有意义，因为彗差使像的质心偏移主光线。
- 2) Chief Ray: RMS或PTV的计算是参考主波长的主光线的；
- 3) Mean(平均值): 只能用于数据类型是波像差的情况；

Rings and Arms

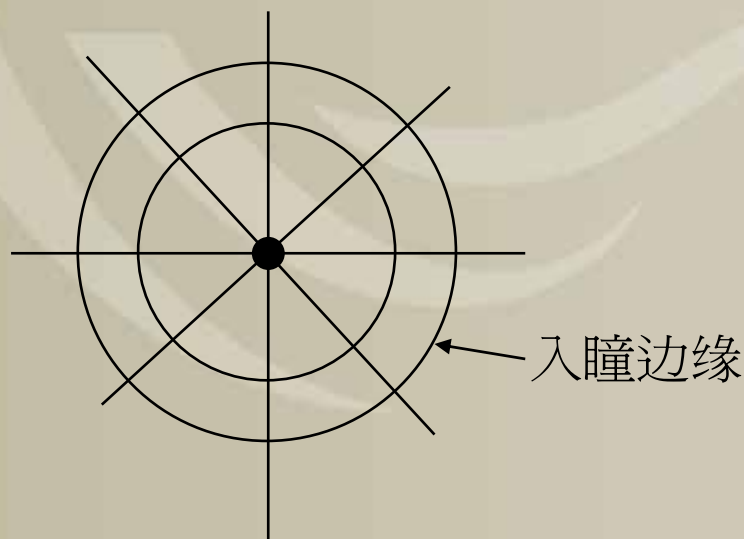
- 对光学设计，积分是在入瞳上的。
- GQ 算法需要指定“Rings”和“Arms”的数目。
- “Rings”指定每个视场和波长追迹多少光线；对旋转对称系统和非旋转对称系统，光线的数量不同。
- “Arms”指定多少radial arms。指定在pupil中追迹的光线的radial arms 数目。
- 对大多数光学设计，3rings足够了；对非球面用4个rings。
- 缺省值，追迹6个等间隔的(in angle) arms (对旋转对称系统追迹3个)。可以改为8,10,12。但对大多数的光学系统，6个足够了。
(因为pupil aberration对角度变化很慢)。

Rings and Arms

- 这里是缺省的3 rings ,6arms的pupil sampling。对每个视场、每个波长，追迹18根光线，
- 对LR对称系统，只追迹一半的pupil，对园形对称系统，只追迹一个arm。

3 rings, 6 arms

环形区域的面积相等。



Grids

- “Grid“只能用于RA 算法。其值决定所用的光线的数目。可以是4x4 (16 rays per field per wavelength), 6x6 (36 rays per field per wavelength)等;
- 如果光线跑到入瞳外面去了, 则自动略去这个grid中的光线, 所以实际使用的光线数目要比grid size中的少;
- 应用时, 选择大的grid density,然后选择“Delete Vignetted” (merit function中的所有光线都会通过系统追迹) 比较好。因为这样光线可以充满pupil,会删除渐晕操作数。光线的数目可以精确反映系统的孔径。

Boundary value

Thickness Boundary value:

- 1) 正透镜边缘厚度;
- 2) 负透镜中心厚度;
- 3) 空气间隔

Weight

操作数的权重：绝大部分为正。

- 1) <0 ，使用Lagrange multiplier,相当于权重为无穷大；会迫使优化算法完全满足我们的约束要求，而不考虑其它操作数的影响。(对边界条件不适用)
- 2) $=0$ ，不考虑这个操作数；
- 3) >0 ，权重实际值，使MF最小。

Default Merit functions的不足

- 如果field、wavelength values、weights改变了，则必须重新构建 default merit function。
- 如果用RA 算法，如果在优化过程中渐晕有一点变化，也需要重新构建 default merit function。

Operands

ZEMAX提供了200多种操作数(用4个大写字母缩写组成), 如 EFFL, 可以控制包括系统参数、像差、MTF、圆内能量集中度、光线约束、边界约束条件、玻璃材料的范围等。

Operands分类

- First-order optical properties :

AMAG, ENPP, EFFL, EFLX, EFLY, EPDI, EXPP, ISFN,
LINV, OBSN, PIMH, PMAG, POWR, SFNO, TFNO,
WFNO

Operands分类

- Aberrations :

ANAR, ASTI, AXCL, BIOG, BIOD, BSER, COMA,
DIMX, DISC, DISG, DIST, FCGS, FCGT, FCUR, LACL,
LONA, OPDC, OPDM, OPDX, OSCD, PETC, PETZ,
RSCE, RSCH, RSRE, RSRH, RWCE, RWCH, RWRE,
RWRH, SPCH, SPHA, TRAC, TRAD, TRAE, TRAI,
TRAR, TRAX, TRAY, TRCX, TRCY, ZERN

Operands分类

- MTF data :
GMTA, GMTS, GMTT
MSWA, MSWS, MSWT
MTFA, MTFS, MTFT

Operands分类

- Encircled energy :
DENC, DENF, GENC, XENC

Operands分类

- Constraints on lens data :

COGT, COLT, COVA

CTGT, CTLT, CTVA

CVGT, CVLT, CVVA

DMGT, DMLT, DMVA

ETGT, ETLT, ETVA

MNCA, MNCG, MNCT, MNCV

MNEA, MNEG, MNET , MNPD

MXCA, MXCG, MXCT, MXCV

MXEA, MXEG, MXET , MXSD

TTGT, TTHI, TTLT, TTVA

XNEA, XNET, XNEG, XXEA, XXEG, XXET, ZTHI

Operands分类

- Constraints on lens properties :

CVOL, MNDT, MXDT, SAGX, SAGY, TMAS, TOTR,
VOLU

Operands分类

- Constraints on parameter data :
PMGT, PMLT, PMVA.
- Constraints on extra data:
XDGT, XDLT, XDVA
- Constraints on glass data:
GCOS, GTCE, INDX, MNAB, MNIN, MNPD, MXAB,
MXIN, MXPDP, RGLA

Operands分类

- Constraints on paraxial ray data:

PANA, PANB, PANC; PARA, PARB, PARC; PARR,
PARX, PARY, PARZ; PATX, PATY; YNIP

- Constraints on real ray data:

CENX, CENY, DXDX, DXDY, DYDX, DYDY, HHCN,
IMAE, OPTH, PLEN, RAED, RAEN, RAGA, RAGB,
RAGC, RAGX, RAGY, RAGZ, RAID, RAIN, RANG,
REAA, REAB, REAC, REAR, REAX, REAY,
REAZ, RENA, RENB, RENC, RETX, RETY

Operands分类

- Constraints on element positions:
GLCA, GLCB, GLCC, GLCX, GLCY, GLCZ
- Changing system data:
CONF, IMSF, PRIM, SVIG

Operands分类

- General math operands:

ABS0, ACOS, ASIN, ATAN, CONS, COSI, DIFF, DIVI,
EQUA, LOGE, LOGT, MAXX, MINN, OPGT, OPLT,
OPVA, OSUM, PROD, QSUM, SQRT, SUMM, SINE,
TANG

- Multi-configuration (zoom) data:

CONF, MCOL, MCOG, MCOV, ZTHI

Operands分类

- Gaussian beam data:
GBPD, GBPP, GBPR, GBPS, GBPW; GBSD, GBSP,
GBSR, GBSS, GBSW
- Gradient index control operands:
DLTN, GRMN, GRMX; InGT, InLT, InVA; LPTD
- Foucault analysis:
FOUC

Operands分类

- Ghost focus control:
GPIM
- Fiber coupling operands:
FICL, FICP, POPD
- Relative illumination operand:
RELI
- Optimization with ZPL macros:
ZPLM

Operands分类

- Merit function control operands:
BLNK, DMFS, ENDX, GOTO, OFF, SKIN, SKIS, USYM
- Constraints on non-sequential object data:
NPGT, NPLT, NPVA;NPXG, NPXL, NPXV; NPYG,
NPYL, NPYV;NPZG, NPZL, NPZV; NTXG, NTXL,
NTXV;NTYG, NTYL, NTYV; NTZG, NTZL, NTZV
- Non-sequential ray tracing and detector operands:
NSDC, NSDD, NSRA, NSTR

Operands分类

- Constraints on construction optics for optically fabricated holograms:
CMFV
- Constraints on optical coatings:
CMGT, CMLT, CMVA, CODA
- Physical Optics Propagation(POP) results:
POPD
- Tolerance sensitivity data:
TOLR

Defining complex operands

ZEMAX缺省的MF不能满足用户需要时，用户可以自己构建评价函数，有两种方法：

- 对缺省的merit function进行重新定义；
- 用operands手动编辑merit function.

用 MTF操作数优化MTF

MTF操作数能够直接优化MTF的值，这个功能很强。但使用时需要注意：

- 对不接近diffraction limit的系统（波像差大于2—5个波长），用geometric等效的 MTF operands: GMTT, GMTS和 GMTA.
- 如果sampling太低，则MTF的返回值为0。
- 初始系统为平行平板时，不能得到精确的MTF。
- 用MTF操作数时，int 1为采样密度；int 2表示波长；Hx为视场点的号；Hy为空间频率（cycle/mm），如果超过截止频率，则返回值为0。

对zoom和multi-configuration lenses的优化

- 对multi-configuration的优化与一般的single-configuration lens的优化是一样的。
- 在优化时，所有的结构会一起优化。

Optimization使用建议

- 在设计初期，优化时不需要追迹所有视场和波长的光线。这可以节省计算时间。权重设置为0的视场或波长不进行追迹。
- 使用视场点平衡
- 用solve代替variables+constraints
- 尽可能用缺省优化函数
- 使用边界条件控制操作数
- 使用对称性可以只用Y视场
- 尝试交换Merit functions: 在spot radius和wavefront之间交换一下，可能会使其起始点发生一些改变
- 查看无用的变量
- 要搞清楚哪些量在变
- 用Hammer优化

使用视场点平衡

- 选择适当的视场点数目，使视场划分为等面积的园环；
- 对比较小的视场，就用0,1二个视场；
- 对中等视场（小于 ± 20 度），用0,0.7和1三个视场；
- 对大的视场，用0, 0.577, 0.816和1四个视场。

使用solve

尽量用solve的功能。例如：有二种方法去控制边界条件：

- 1) 使所有的量都为变量，然后在merit function中加入操作数；
- 2) 去掉一个没用的变量，用solve代替。

例如：

- 在curvature上用MRA或F/# solve控制F/#或EFL；
- 用thickness上MRH solve控制焦点位置；
- 用Pick-Up solve使不同面的对应量之间保持联系；
- 用Position solve控制长度。

尽可能用缺省优化函数

- ZEMAX的default merit function很好用。
- 对瞳为圆形（或者是考虑渐晕因子的椭圆形）的系统，用GQ算法；
- 如果光学系统的接近衍射极限，则用RMS Wavefront（PTV OPD<2波长）；否则用RMS Spot Radius；
- 用Centroid作为参考点比用Chief ray要好一些；通常可以用不同的优化函数进行优化，再看看哪一个设计结果更好。

要知道哪些量在变化

了解像差和系统的联系，及对系统的影响；

- 看Ray fan图最重要；
- 有些图，如MTF和encircled energy告诉你系统的好坏，但不能告诉你哪些变化可以使系统更好；

一旦知道了需要确定哪些量，就要用相应的工具去优化：

- 如果要校正球差，可以在pupil面附近增加asphere,binary optic,gradient index, 或element；
- 如果要校正视场像差，可以考虑移动光栏，或者上面的方法；
- 如果要校正色差，用新玻璃；
- 如果要校正场曲，Petzval, F-theta,也要换玻璃。

用比较好的初始结构

- 一般来说，新的设计都是基于原来的已经有的结构的，所以采用合适的初始结构很重要。

有一些好的光学设计的资料：

- 书籍：1) Milt Laikin:<Lens design>; 2) Warren Smith:<Modern Lens Design>
- 镜头库：1) ZEBASE:600多个设计，配Laikin的<Lens design>书;
2) LensVIEW:大约60000个光学设计专利。

使用Hammer

- 这是个很有效的全局优化方法;
- 它可以运行几个小时或者几天;
- 可以通过Glass substitution选择玻璃和改进设计。

Pick Up练习—Double-pass system

Double-pass system

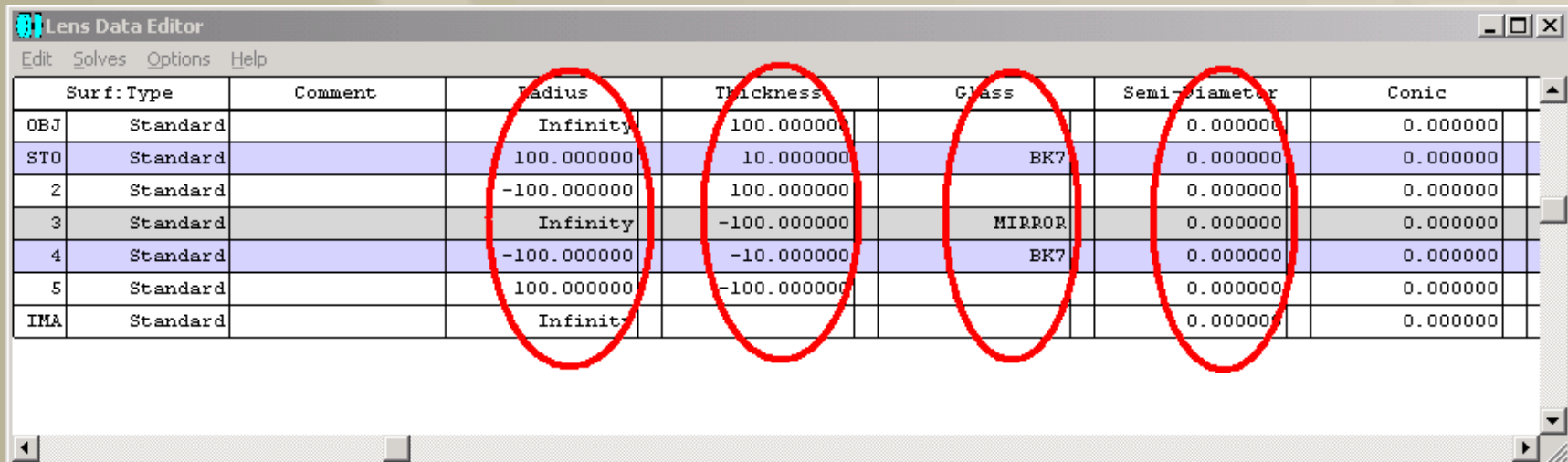
目的：学习和体会Pick up solve的功能。

题目：光线通过一个透镜，遇到一个反射镜以后，反射回来，再次通过这个透镜。具体要求为：

- 物距=100mm，光栏在反射镜上；
- 透镜厚度=10mm，玻璃为BK7，NA=0.1，二个面的曲率半径分别为100mm,-100mm，都是变量；
- 透镜到反射镜的距离为100mm；
- 物高为10mm，一个视场点；光源波长为 $0.55 \mu\text{m}$
- 对spot radius进行优化；
- 用pick up solve保持radii的一致。

Step 1: Lens data

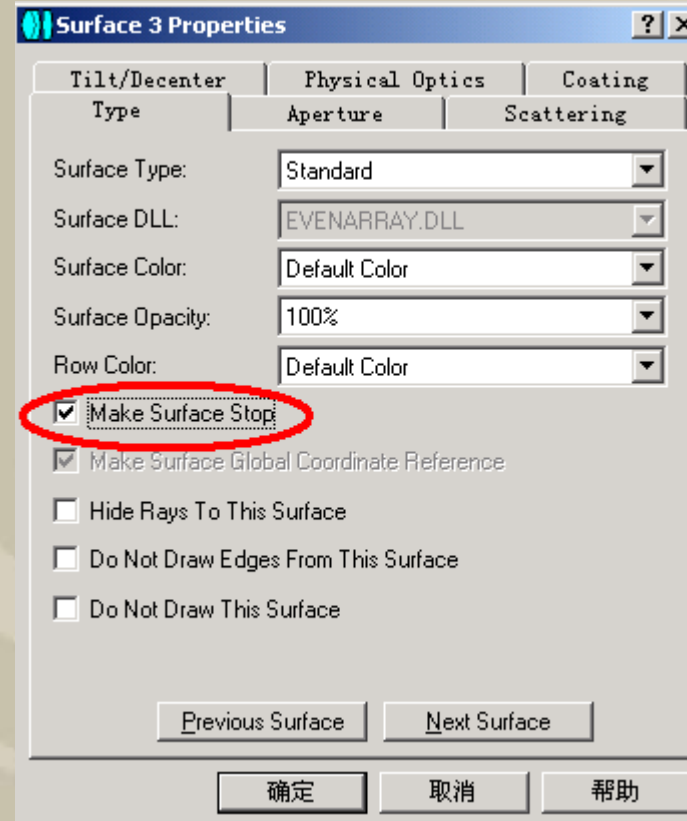
- New>>打开Lens data editor>>在OBJ和IMA之间插入5个面。
- 输入radius, thickness, glass参数。注意Thickness符号的变化。
- Semi-Diameter的数据都为0。



Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	100.000000		0.000000	0.000000
ST0	Standard		100.000000	10.000000	BK7	0.000000	0.000000
2	Standard		-100.000000	100.000000		0.000000	0.000000
3	Standard		Infinity	-100.000000	MIRROR	0.000000	0.000000
4	Standard		-100.000000	-10.000000	BK7	0.000000	0.000000
5	Standard		100.000000	-100.000000		0.000000	0.000000
IMA	Standard		Infinity			0.000000	0.000000

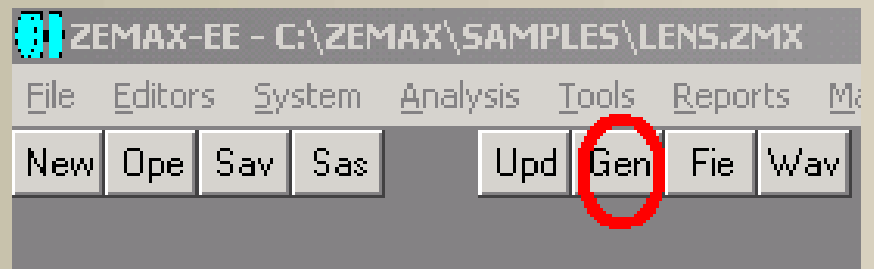
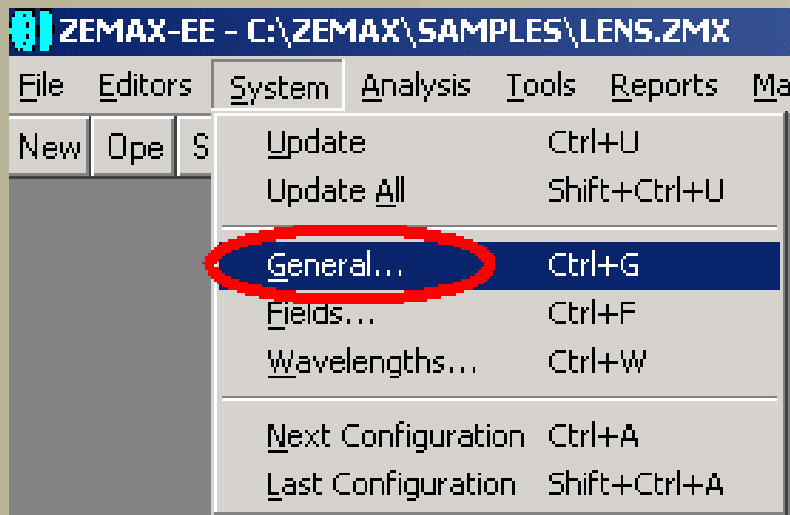
Step 2: Stop设置

- 在surface 3的standard面形处点
- 右键或左键，弹出surface property对话框；
- 将Make surface stop复选框选中，将光栏放在反射镜上。



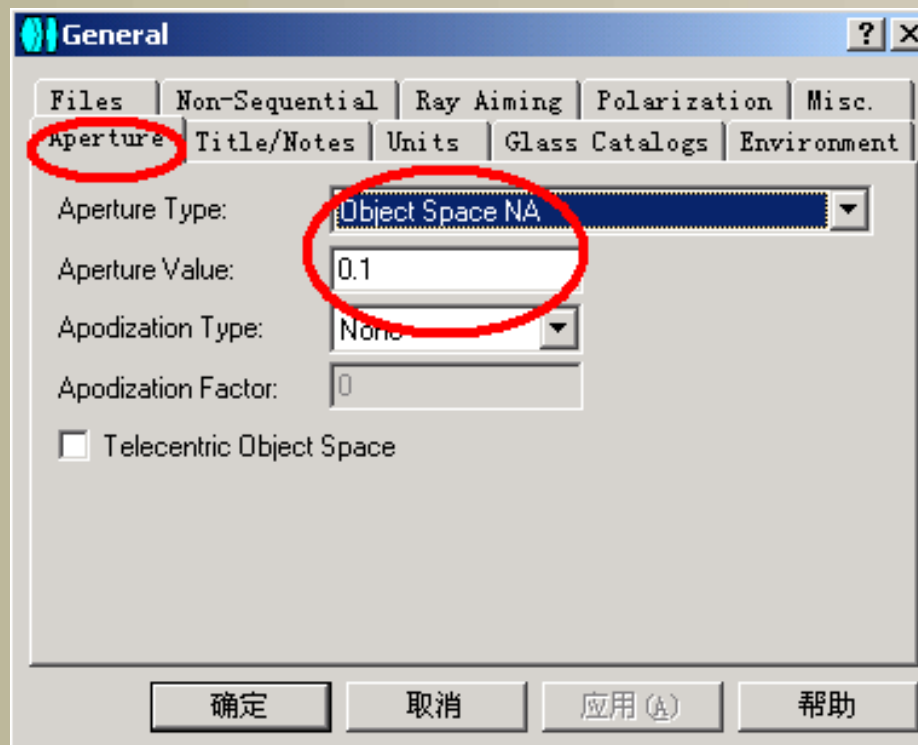
Step 3: General 设置

- System>>General(或Gen工具栏按钮), 弹出General设置对话框;

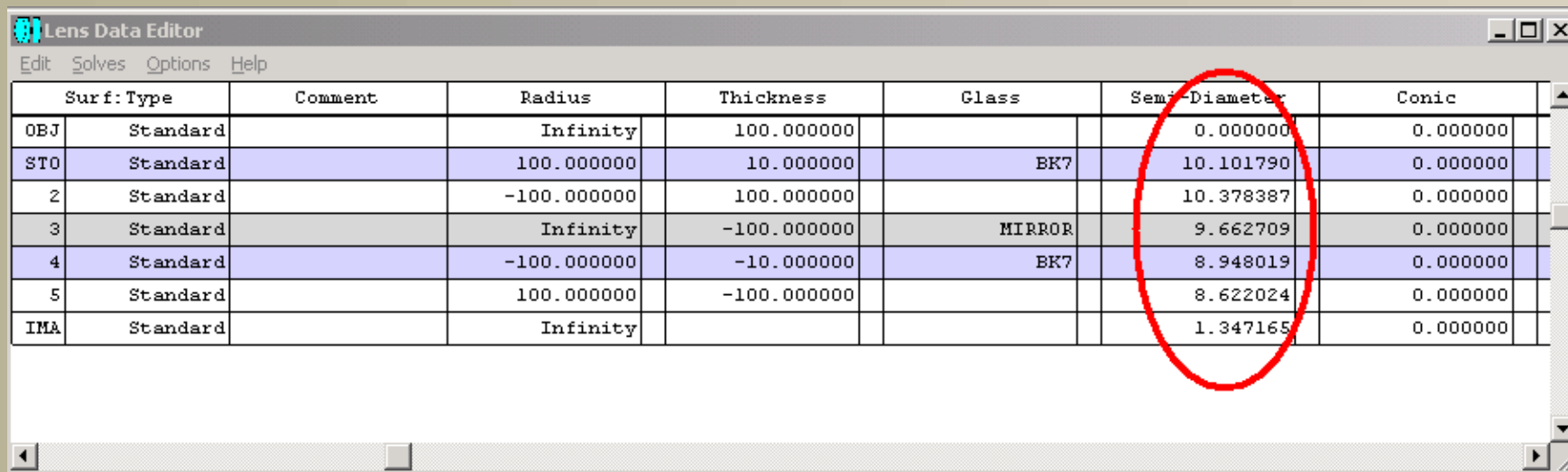


General 设置

- 选择Aperture项，将Aperture type设置为object space NA, Aperture value为0.1，并确定。



- 这时，Lens data中的Semi-Diameter中会自动给出合适的的数据，但OBJ一栏的Semi-Diameter仍然为0。



Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	100.000000		0.000000	0.000000
STO	Standard		100.000000	10.000000	BK7	10.101790	0.000000
2	Standard		-100.000000	100.000000		10.378387	0.000000
3	Standard		Infinity	-100.000000	MIRROR	9.662709	0.000000
4	Standard		-100.000000	-10.000000	BK7	8.948019	0.000000
5	Standard		100.000000	-100.000000		8.622024	0.000000
IMA	Standard		Infinity			1.347165	0.000000

Step 4: Field point 设置

- System>>Fields (或Fie工具栏按钮),弹出Field data窗口。
- 选择Object Height为视场, 在Y-Field中输入10。

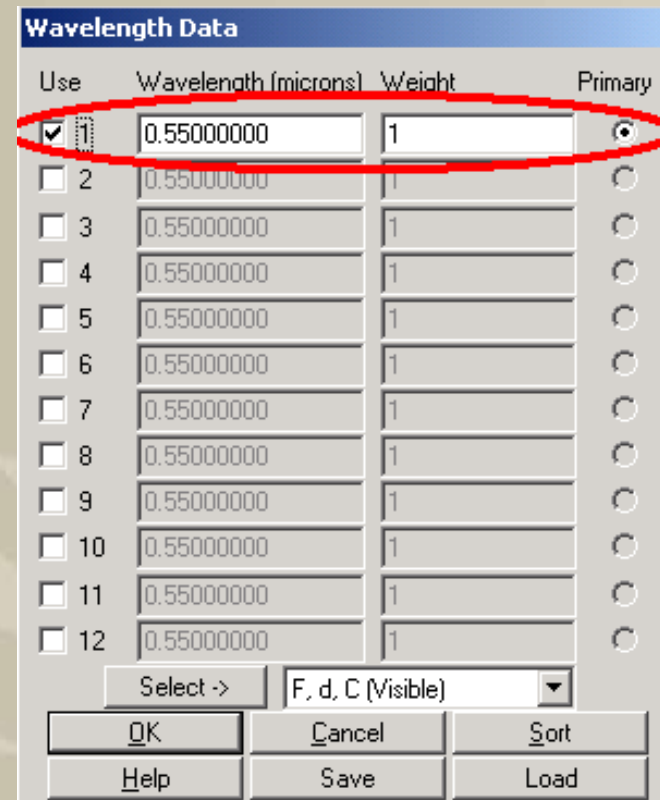
Field Data

Angle (Deg) Paraxial Image Height
 Object Height Real Image Height

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0	10	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 2	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 3	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 4	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 5	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 6	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 7	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 8	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 9	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 10	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 11	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 12	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

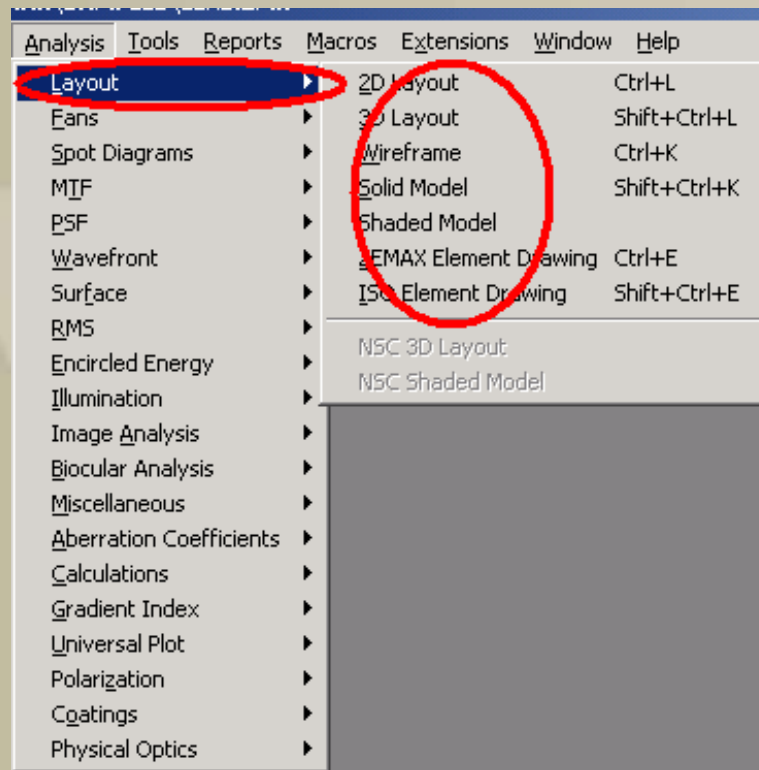
Step 5: Wavelength 设置

- System>> Wavelength (或Wav 工具栏按钮), 弹出 Wavelength data 窗口。
- 选择 OK, 将光源波长设置为 $0.55 \mu\text{m}$ 。

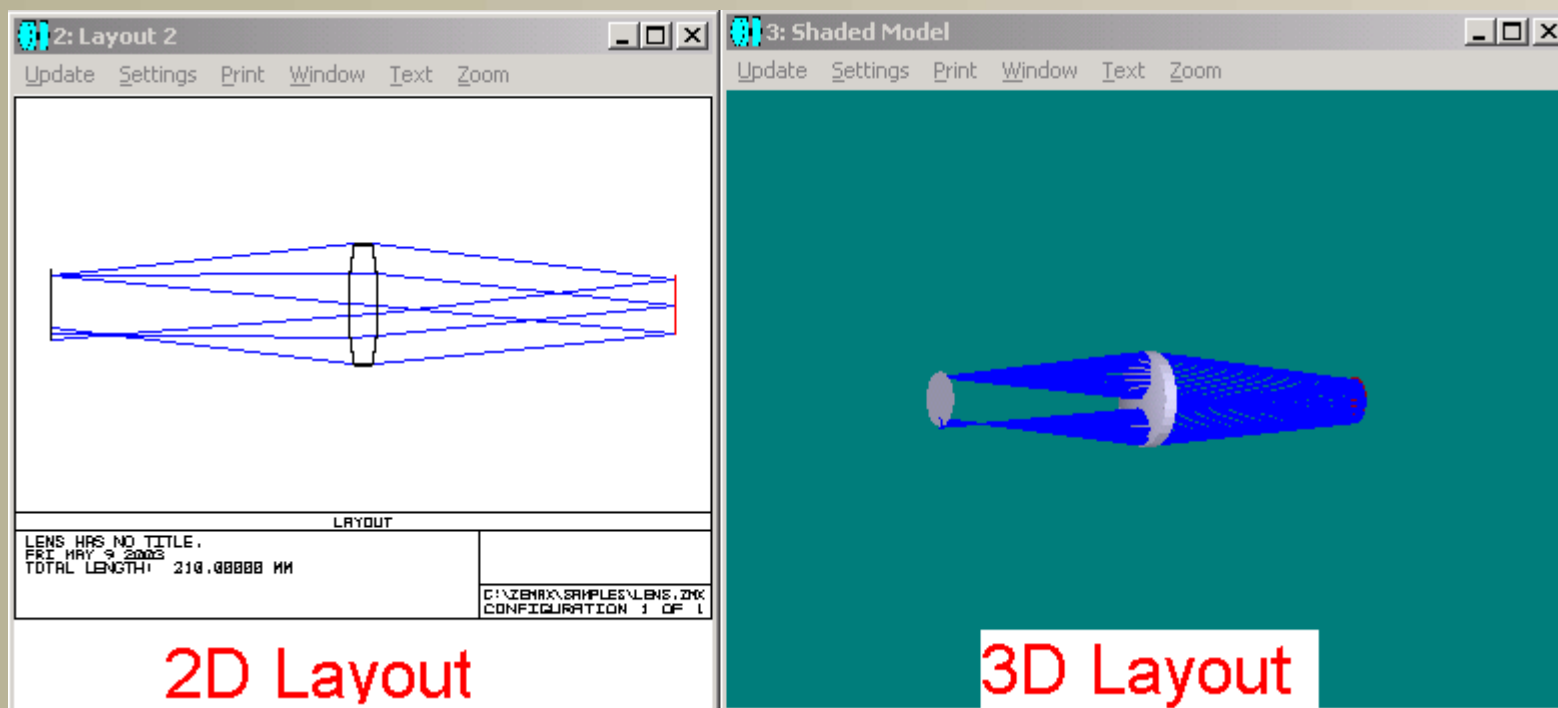


Step 6: Layout

- 通过Analysis>>Layout(或Lay,L3d工具栏按钮)查看系统的外观图形。



2D Layout 和 Shaded Model



Step 7: 设置变量和Pick Up

- 在优化过程中，需要将radius和thickness设置为变量。
- 为了使surface 4,5与surface2,1的参数一起变化，需要对surface 4,5用Pick Up solve。

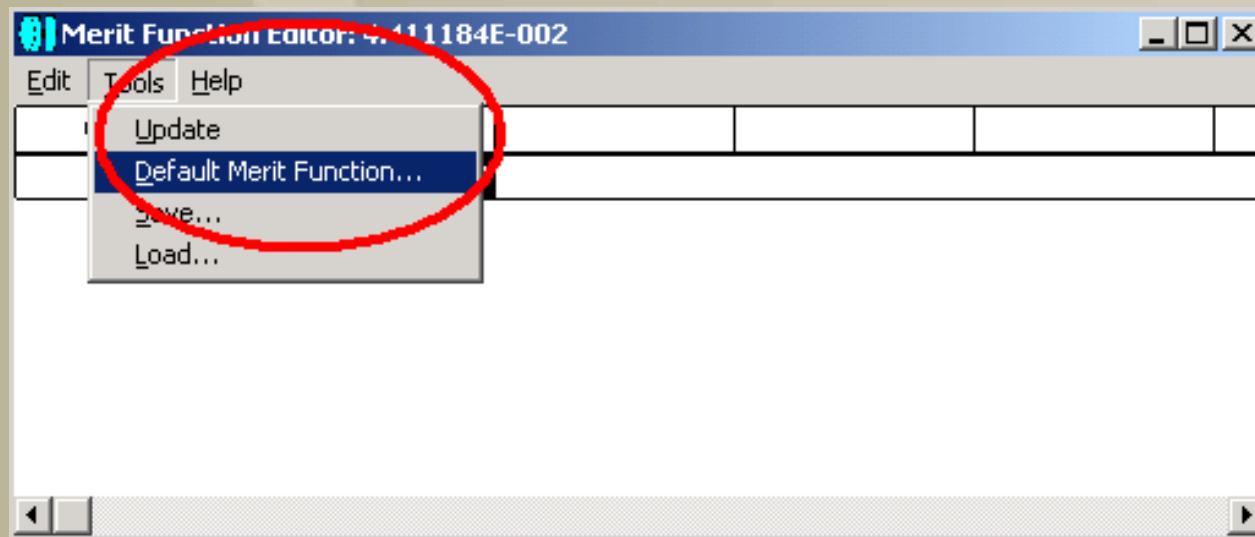
Lens Data Editor

Edit Solves Options Help

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	100.000000 V		10.000000
1	Standard		100.000000 V	10.000000 V	BK7	20.829580
2	Standard		-100.000000 V	100.000000		20.806531
STO	Standard		Infinity	-100.000000 P	MIRROR	9.833749
4	Standard		-100.000000 P	-10.000000 P	BK7 P	19.712608
5	Standard		100.000000 P	-100.000000 P		19.677533
IMA	Standard		Infinity			12.018215

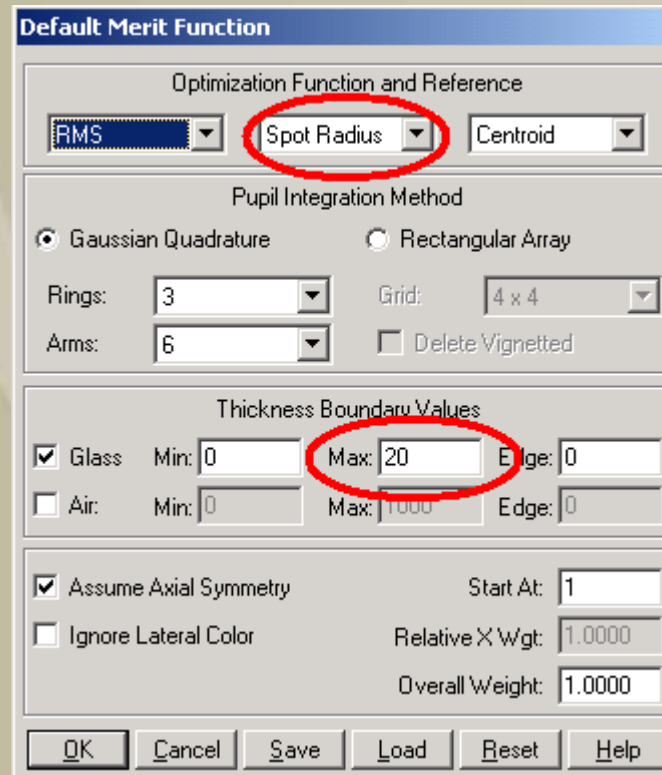
Step 8: Merit Function 设置

- Editors>>Merit function,弹出Merit function editor对话框,
- 从Tools>>Default Merit function中调出Default Merit function



Default Merit function设置

- 将优化数设置为spot radius，玻璃的最大厚度为20mm



Default Merit Function

Optimization Function and Reference

RMS | **Spot Radius** | Centroid

Pupil Integration Method

Gaussian Quadrature Rectangular Array

Rings: 3 Grid: 4 x 4

Arms: 6 Delete Vignetted

Thickness Boundary Values

<input checked="" type="checkbox"/> Glass	Min: 0	Max: 20	Edge: 0
<input type="checkbox"/> Air	Min: 0	Max: 1000	Edge: 0

Assume Axial Symmetry Start At: 1

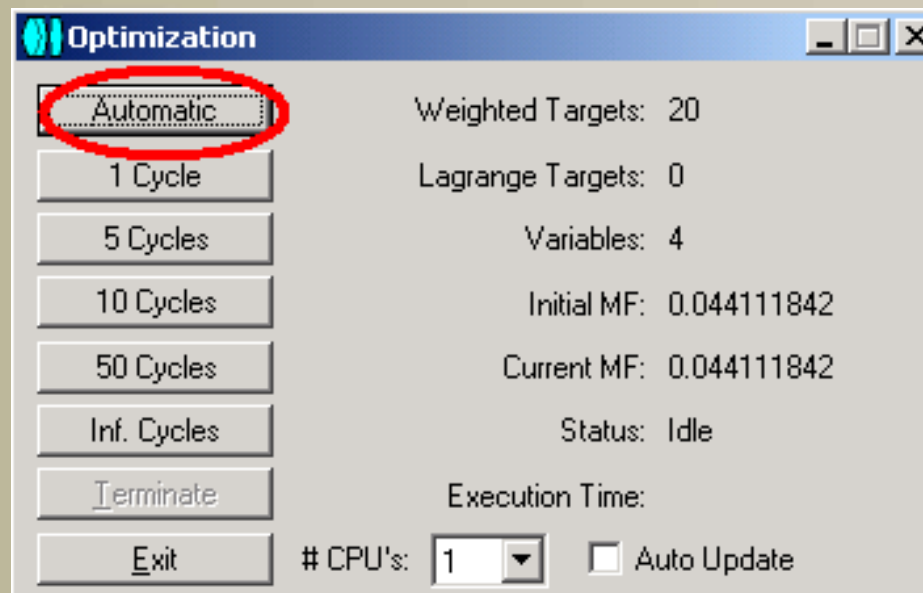
Ignore Lateral Color Relative X Wgt: 1.0000

Overall Weight: 1.0000

OK Cancel Save Load Reset Help

Step 9: Optimization

- Tools>>Optimization(或工具栏中的Opt按钮), 调出优化运行对话框, 选择automatic的方式进行优化。在执行优化运算的过程中, MF的值在减小, 直到其减小的比例小于设定值。



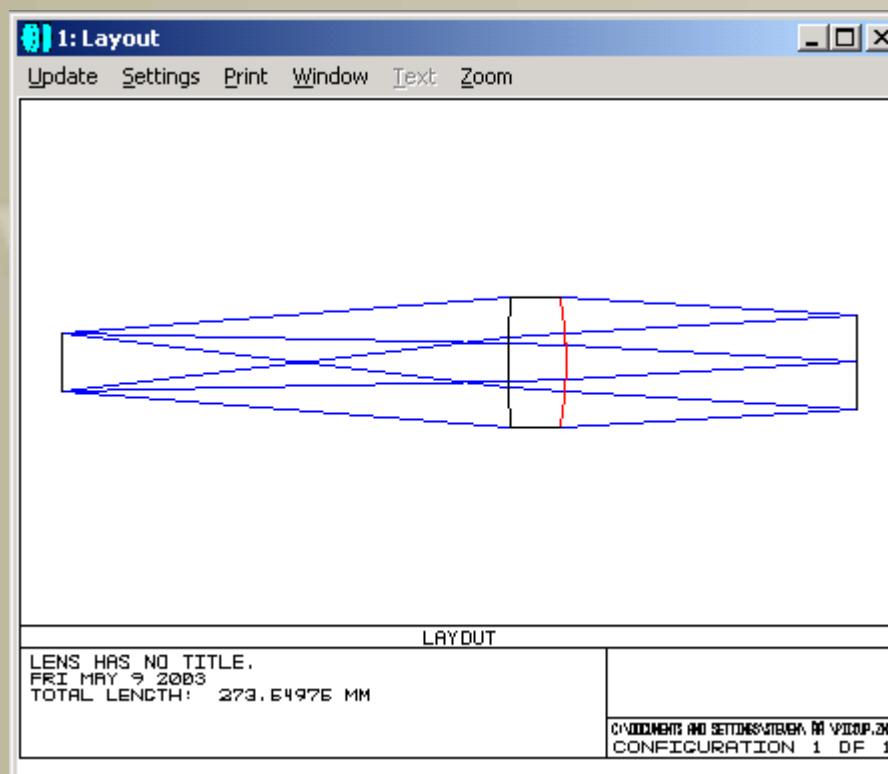
优化后的Lens data

- 在优化过程中，设置为变量的参数会改变。通过使用Pick Up solve，确保使surface 4,5的radius和thickness随surface 1,2一起变。

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	153.549743 V		10.000000
1	Standard		257.661443 V	20.000012 V	BK7	22.076520
2	Standard		-124.275667 V	100.000000		22.447429
STO	Standard		Infinity	-100.000000 P	MIRROR	16.379461
4	Standard		-124.275667 P	20.000012 P	BK7 P	22.647468
5	Standard		257.661443 P	-153.549743 P		22.255555
IMA	Standard		Infinity			10.180789

优化后的Layout

- 通过优化，将像成在像面上，并且得到最小的spot size。



双胶合镜头 (Doublet) 设计练习

例子：双胶合镜头设计

双胶镜头是个比较好的练习：

- 几乎所有光学设计都有双胶合透镜，其中一块正透镜常用冕玻璃，负透镜用火石玻璃，
- 通过正确选择玻璃，可以校正球差、彗差和轴向色差，
- 有些设计，可以通过将单透镜分裂为双胶合透镜得到改进。

双胶合透镜包含的结构参数有：

- 3个曲率半径，
- 3个厚度值，
- 2种玻璃的折射率和V-number，
- 光栏的位置。

设计要求

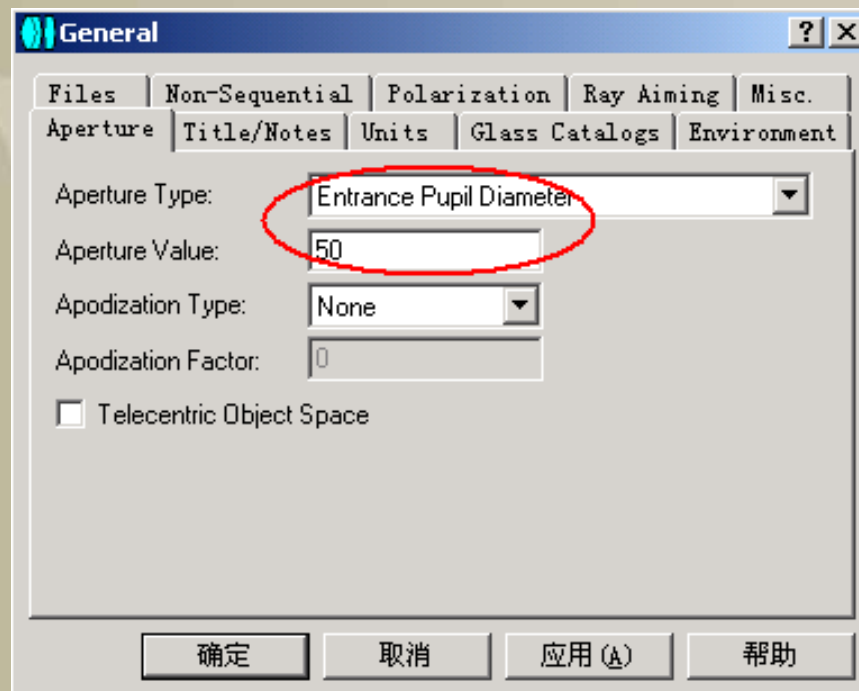
- 用F, d, C光
- EPD=50mm
- F/8
- FOV=10度
- 最小的边缘/中心厚度为4mm, 最大中心厚度为18mm
- 使用合适的标准
- 选择合适的玻璃

设计过程

- 定义系统的孔径
- 定义视场和波长(各3个)
- 定义正确的面数
- 增加F/# solve
- 假定初始玻璃为常用的冕玻璃和火石玻璃：**BK7**和**F2**
- 建立优化函数，用**RMS spot radius**优化
- 增加边界约束条件
- 优化玻璃

第一步：系统General data设置

- 选择“Gen”按钮，在aperture type中选择Entrance pupil diameter, Aperture value为50。



第二步：视场和波长的设置

- 点“Fie”和“Wav”按钮，
- 视场角为0，7，10三个，
- 波长直接选择可见光。

Wavelength Data

Use	Wavelength (microns)	Weight	Primary
<input checked="" type="checkbox"/>	0.48613270	1	<input type="radio"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	0.58756180	1	<input checked="" type="radio"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	0.65627250	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>
<input type="checkbox"/>	0.55000000	1	<input type="radio"/>

Select -> F, d, C (Visible)

OK Cancel Sort
Help Save Load

Field Data

Angle (Deg) Paraxial Image Height
 Object Height Real Image Height

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	V CX	V CY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0	7	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0	10	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

OK Cancel Sort Help
Set Vig Clr Vig Save Load

第三步：建立surface data

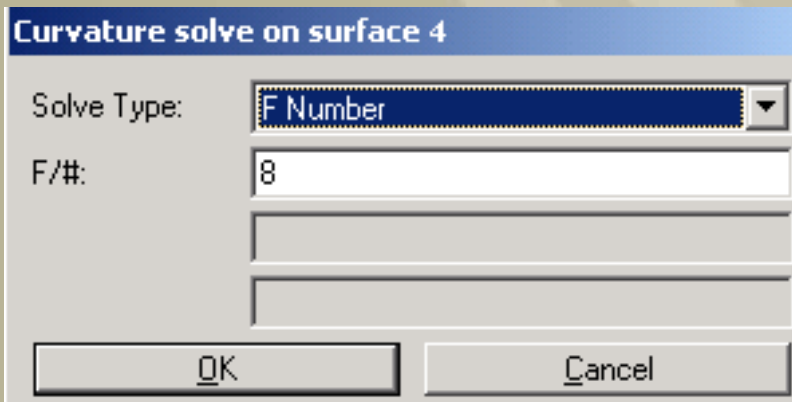
- 建立6个面，包括Obj, Stop,3 lens和image surface。
- 输入玻璃牌号，前面为BK7,后面为火石F2。

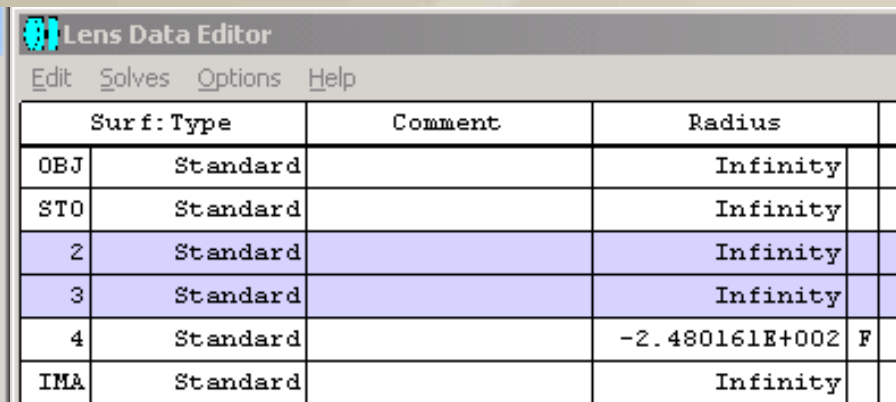
Lens Data Editor							
Edit Solves Options Help							
Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.00000000000	0.00000000000
STO	Standard		Infinity	0.00000000000		25.00000000000	0.00000000000
2	Standard		Infinity	0.00000000000	BK7	25.00000000000	0.00000000000
3	Standard		Infinity	0.00000000000	F2	25.00000000000	0.00000000000
4	Standard		Infinity	0.00000000000		25.00000000000	0.00000000000
IMA	Standard		Infinity			25.00000000000	0.00000000000

第四步：为F/#添加Solve

在光学面4的curvature上，增加solve：

- 将surface 4的radius栏上点右键，
- 选择F/#的solve type，输入其值为8，
- ZEMAX会自动调整这个面的曲率半径的值。

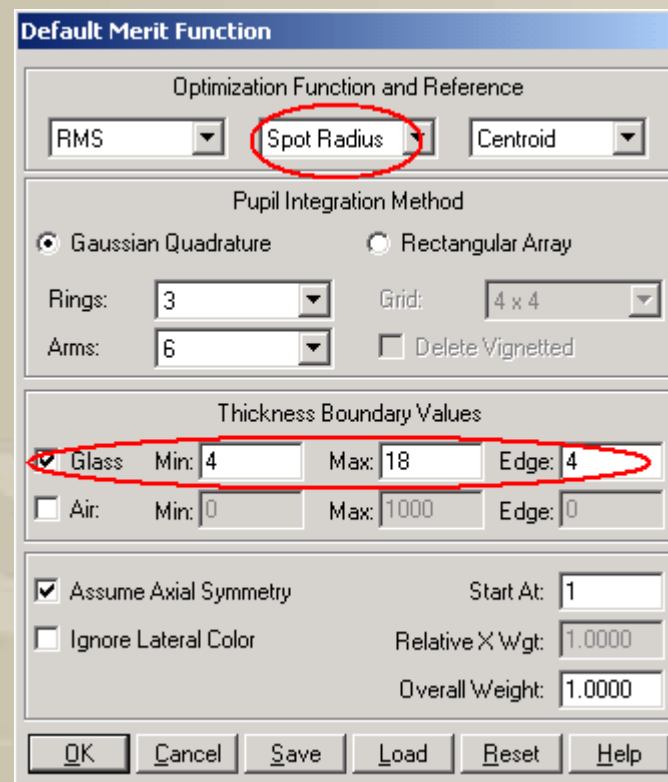




Surf	Type	Comment	Radius	F
OBJ	Standard		Infinity	
STO	Standard		Infinity	
2	Standard		Infinity	
3	Standard		Infinity	
4	Standard		-2.480161E+002	F
IMA	Standard		Infinity	

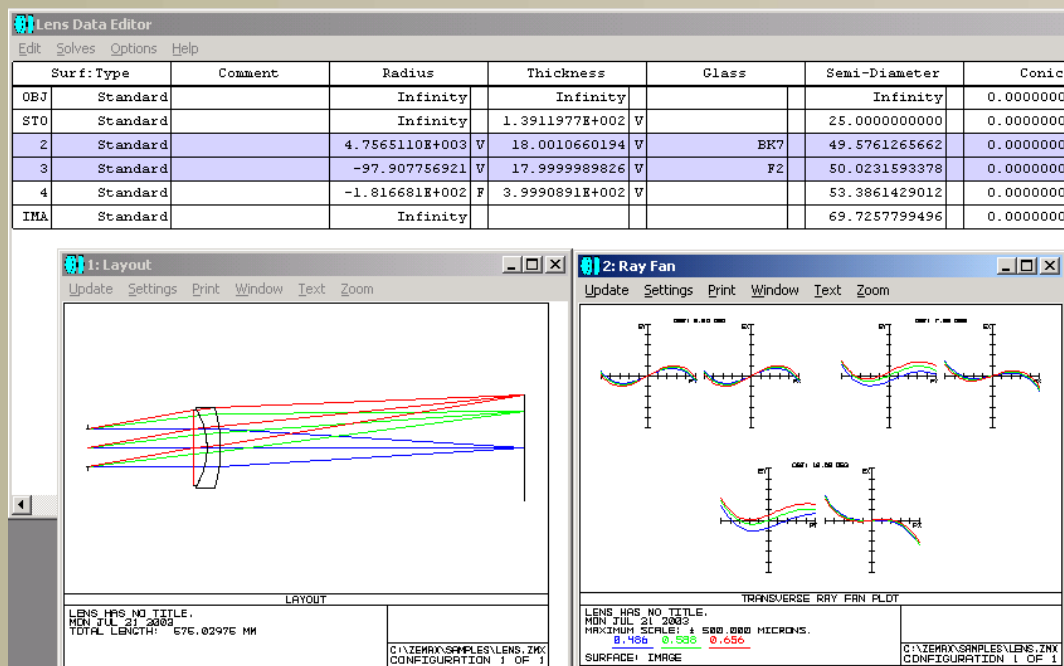
第五步：建立优化函数

- 打开Editor>>Merit Function,
- 打开Default merit function对话框, 选择RMS spot radius作为优化数据, 加入边界约束条件。



第六步：设置变量并优化

- 将2个曲率半径和4个厚度都设置为变量，
- 优化计算。
- 结果的2D layout和ray fan如下：

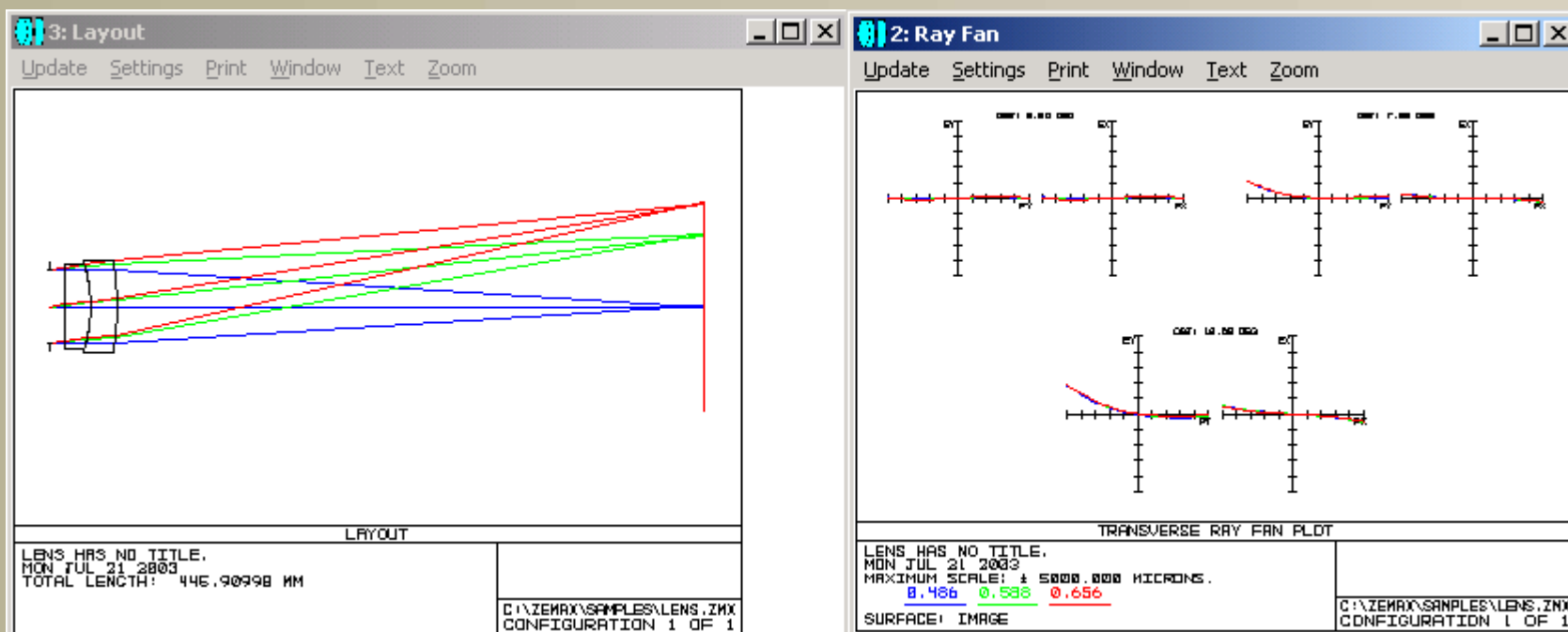


第七步：分析

- 哪些像差已经校正了？哪些没有校正？哪个是主要的像差？光阑的位置如何？
- 本设计中：
 - (1)不需要专门指定色差的目标值
 - (2)缺省优化函数对轴上色差有比较好的校正
 - (3)将光阑向离开透镜的方向移动，会引入横向色差
 - (4)边界条件基本满足
 - (5)可以将stop向透镜的方向移动，以减小横向色差。

第八步：修改设计

- 将光栏向透镜移动，可以将横向色差降低，但引入了象散、彗差、离焦和spot radius的扩大。



改进设计

- 分析：
 - (1)一个半径是控制EFL的，另外二个是控制色差的，
 - (2)光栏的位置对控制象散和彗差的效果不是太理想，
 - (3)改变厚度的影响不是太大，特别是有边界条件约束的情况下，
 - (4)主要要校正像差是：球差、横向色差和轴向色差。
- 校正球差的可能办法：(1)增加conic constant；(2)增加透镜
- 校正色差的可能办法：(1)移动光栏，但在这里帮助不大；(2)用新的玻璃。

进行玻璃优化

- 尝试下列玻璃组合：
- BK7 & SF1
- BK7 & SF2
- BK7 & SF5
- 或者直接对玻璃进行优化。有几种办法：
- (1)直接输入几种组合，进行优化，
- (2)对拟合玻璃的方程的参数进行优化---“model”glass，一般不推荐使用，
- (3)采用“substitute”的方法优化。容易、速度快，推荐使用。

Glass substitution方法

- 这种方法更容易、更可靠。它可以用global optimization算法，也可以用hammer算法，找到更好的玻璃。
- 步骤：
 - (1)将所有玻璃设置“substitute”solve，在Schott公司的玻璃，然后运行hammer，
 - (2)以BK7/SF5开始。可能会得到BAK1/SF1 或其它组合，
 - (3)看看所找到玻璃的成本：将光标放在玻璃上，点GLA，BAK1的为1.67,SF1的为2.25，结果还可以。

Glass substitution的限制

- 如果没有限制，会从所有目录中选择玻璃。可以用下面的方法，只让ZEMAX从指定的目录中选择玻璃：
 - (1)在solve中指定玻璃库的名称，不同的面可以指定不同的库，
 - (2)用GCOS操作数，控制玻璃的相对成本，
 - (3)通过在玻璃目录中选择exclude复选框，排除不想要的玻璃，
 - (4)增加其它的操作数控制重量、折射率或阿贝数，
 - (5)用Tools>>glass substitute template。可以限定材料的相对成本和其它物理化学特性，它适用于整个光学系统，只能用于global optimization中。
- 以上方法可以同时使用。

总结

- 一般需要限定玻璃最小中心/边缘厚度，
- 对EFFL操作数，可以用solve代替，
- 选择不同的玻璃会影响色差，它可以使曲率半径用来校正球差。

Tolerancing

Tolerancing概述

- 一个好的设计是要求能够实际制造出来的。
- 设计好的光学系统需要进行公差分析才算真正完成。需要在制造误差的范围之内能够满足要求；
- 一个好的设计没必要完全和设计要求一致，应该是能够制造出来，并尽量满足设计要求。
- 公差分析是将各种扰动或像差引入到光学系统中去，看系统在实际制造各种误差范围内的效果。也就是在能满足设计要求的情况下，系统中各个量允许的最大偏差是多少。

误差来源

有很多方面需要考虑:

- Errors in fabrication
- Errors in materials
- Errors in assembly
- Errors due to environment
- Residual design errors

Fabrication Errors

制造方面的误差包括:

- 曲率半径有误差(radius of curvature)
- 厚度有误差(element thickness)
- 面形误差(surface shape)
- 曲率中心与机械中心有偏差(center offset)
- 二次项或其它非球面项系数误差

Material Errors

材料误差包括:

- 折射率的精度误差
- 折射率均匀性误差 (homogeneity)
- 折射率分布误差(distribution)
- Abbe 数 (dispersion)

Assembly Errors

装配误差包括（Element error）：

- 元件对机械轴（X，Y）的偏差
- 元件在Z轴上的位置有偏差
- 元件的排列的偏差
- 元件对光轴倾斜的偏差

Environment Errors

环境方面的包括温度，湿度，气压：

- 光学和机械材料的热胀冷缩
- 湿度对折射率的影响
- 压强和湿度对折射率的影响
- 系统受振动的影响
- 机械方面的应力

Design Error

- 一般来说，光学系统都有剩余误差（即 $MF \neq 0$ ）。
- 设计误差一般因系统的视场而不同
- 设计结果必须超过设计要求，这样才能在公差的影响范围内，制造出来的系统能够满足使用要求。

Error Budget

公差预算主要是考虑所有可能误差因素对系统性能的影响。可以让设计者在一定的限制范围内预估装配后的镜头的性能。

要建立公差预算，设计者必须：

- 选择合适的性能指标（MF）
- 确定可接受的最小公差水平
- 计算所有可能的公差影响，包括单个组件、多个组件和装配等
- 指定所有公差项的容限。即在设计、制造、装配和操作中，每一步引入的公差的最大值。

公差范围

• Operand	Commercial	Precision	High Precision
• Wavefront error	0.25 λ RMS	0.1 λ RMS	<0.07 λ RMS
•	2 λ P-V	0.5 λ P-V	<0.25 λ P-V
• Thickness	0.1mm	0.05mm	0.005mm
• Radius	0.5%	0.1%	0.02%
• Index	0.001	0.0002	0.00001
• Surface Decenter	0.1mm	0.01mm	0.001mm
• Surface Tilt	1 arc min	30 arc sec	3 arc sec
• Sphericity	2 fringes	0.5 fringes	0.1 fringes
• Irregularity	1 fringe	0.25 fringe	< 0.1 fringe
• Aspherics	1%	0.5%	0.1%
• Element Tilt	5 arc min	3 arc min	1 arc min
• Element Decenter	0.254mm	0.0254mm	0.005mm

Basic procedure

对镜头进行公差分析的基本步骤如下：

- 1) 定义适当的公差。一般最好从default tolerance开始，可以在 Tolerance Data Editor中定义和修改。
- 2) 修改default tolerances or add new ones，以适合系统要求
- 3) 增加compensators，设置compensators允许的范围。缺省的为 BFL，其它的还有image plane tilt。compensators的数量没有限制。
- 4) 选择合适的标准，有RMS spot radius, wavefront error, MTF, or boresight error等。用自定义merit function还可以定义更复杂的标准或全面的标准。

Basic procedure

- 5) 选择希望的模式， sensitivity or inverse sensitivity。
- 6) 进行公差分析。
- 7) 查看公差分析数据，考虑公差预算，如果需要，还可以再次进行分析。

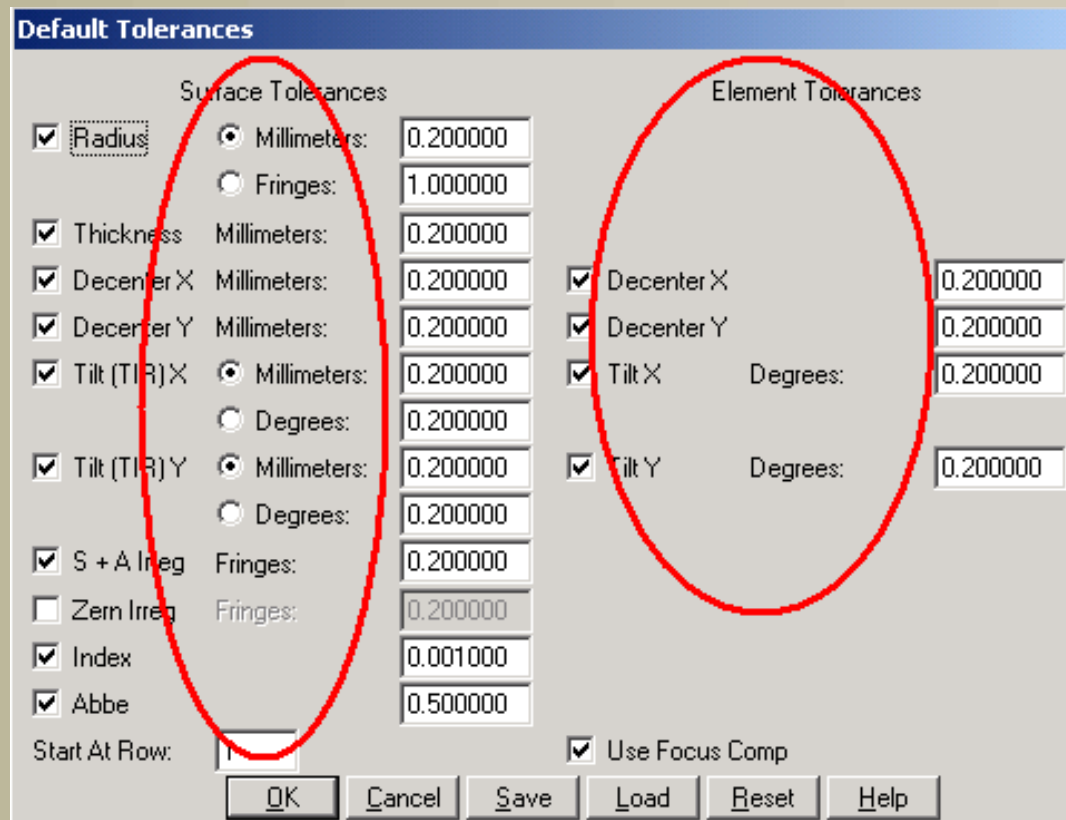
三种计算和分析方法

- **Sensitivity Analysis:**给定公差，计算出各评价标准的变化。也可以单独对各个视场和结构进行计算。
- **Inverse Sensitivity:**给定允许的评价标准变化范围，计算出各公差量的容限。标准可以为所有视场和结构的平均值，或每个结构每个视场上的值
- **Monte Carlo :** Monte Carlo仿真是评估公差的总体影响。可以用均匀分布，正态分布和抛物线分布（uniform, normal, parabolic, or user defined）的统计方法产生任何数量的设计。

对每一个操作数，调整compensator的值，使MF最小。

Defining default tolerances

- Editors>>Tolerance Data Editor>>Tools>> Default Tolerances



Surface Tolerances		Element Tolerances	
<input checked="" type="checkbox"/> Radius	<input checked="" type="radio"/> Millimeters: 0.200000	<input checked="" type="checkbox"/> Decenter X	0.200000
	<input type="radio"/> Fringes: 1.000000	<input checked="" type="checkbox"/> Decenter Y	0.200000
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	Millimeters: 0.200000	<input checked="" type="checkbox"/> Tilt X	Degrees: 0.200000
<input checked="" type="checkbox"/> Decenter X	Millimeters: 0.200000	<input checked="" type="checkbox"/> Tilt Y	Degrees: 0.200000
<input checked="" type="checkbox"/> Decenter Y	Millimeters: 0.200000		
<input checked="" type="checkbox"/> Tilt (TIR) X	<input checked="" type="radio"/> Millimeters: 0.200000		
	<input type="radio"/> Degrees: 0.200000		
<input checked="" type="checkbox"/> Tilt (TIR) Y	<input checked="" type="radio"/> Millimeters: 0.200000		
	<input type="radio"/> Degrees: 0.200000		
<input checked="" type="checkbox"/> S + A Irreg	Fringes: 0.200000		
<input type="checkbox"/> Zern Irreg	Fringes: 0.200000		
<input checked="" type="checkbox"/> Index	0.001000		
<input checked="" type="checkbox"/> Abbe	0.500000		
Start At Row: 1		<input checked="" type="checkbox"/> Use Focus Comp	

Surface tolerances

- Radius: 单位为lens units 或 fringes of power (at the test wavelength) (由TWAV定义)。它只适用于有optical power的面,不包括二边折射率相同的dummy surfaces。如果面为plano,则缺省的公差单位只能为fringes。
- Thickness:假定厚度变量只影响surface 和与element接触的面。
- Decenter X/Y:单位为lens units, 对单个面计算。
- S + A Irreg:对每个标准类型面指定球差和像散不均匀性。
- Zern Irreg:对每个标准类型面指定Zernike不规则性。
- Index: 用TIND表示折射率的变化。
- Abbe: 用TABB表示 Abbe number的变化。

Element tolerances

- Decenter X/Y: 对lens group的公差分析，单位为lens units。
- Tilt X/Y: 对lens group和surface，单位为度。用TETX 和TETY。

Tolerance Operands

- 全部由4个字母组成，如：Tolerance Radius 用TRAD。每个公差操作数都有一个最小和最大值，各个量的公差容限。还可以通过comment对它进行注释。

SURFACE TOLERANCE OPERANDS

公差分析过程中，需要考虑下列参数：

- TRAD, TCUR, TFRN: 关于surface power的公差
- TTHI: thickness或spacing的公差
- TCON: conic的公差
- TSDX, TSDY: Surface decenters(lens units)的公差
- TSTX, TSTY: surface tilts(degrees)的公差
- TIRX, TIRY: Standard surface tilt (TIR)(lens units)的公差
- TIRR: Standard surface irregularity(wave)的公差
- TEXI, TEZI: surface irregularity(用Zernikes多项式)的公差
- TIND, TABB: index, Abbe number的公差
- TPAR, TEDV: paramters或extra data value的公差
- TCMU:coating multipler的公差

TOLERANCE OPERANDS

Element Tolerance

- TEDX, TEDY: element decenters的公差。
- TETX, TETY, TETZ: element tilts的公差。

User Defined Tolerance

- TUDX, TUDY, TUTX, TUTY, TUTZ: 自定义coord breaks

Non-Sequential Component Tolerances

- TNPS: NSC object position的公差。
- TNPA: NSC object parameter的公差。

Multi-Configuration Value Tolerances

- TMCO: multi-configuration editor value的公差。

Defining compensators

- 将像面定位到新的最佳焦点上。它是一个设计参数，用来抵消其他参数中的误差。
- 用compensator可以大大地放松公差的要求，缺省时选择Use Focus Comp，用后节距作为补偿。
- 可以自定义很多类型：任何面的thicknesses (most commonly used), curvature, conic constants, any parameter or extra data value, 或 Multi-configuration operands。
- 一般来说，用的compensators多，则公差更松，但会使系统复杂。
- 所有compensators用COMP, CPAR, CEDV, CMCO来定义，需要用宏ZEMAX语言编程（tolerance script）。

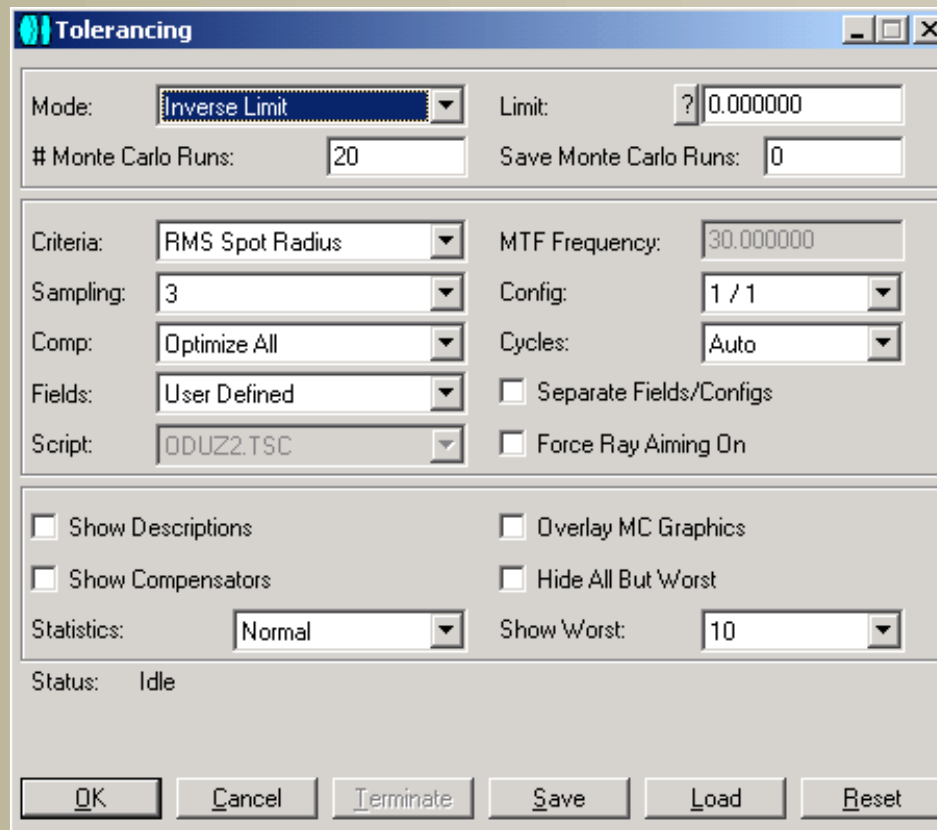
Tolerance control operands

公差控制操作数用来定义compensators,保存中间结果, 定义 statistical properties和为fringe tolerances 定义test wavelength。

- CEDV: 将extra data value定义为compensators
- CMCO: 将multi-configuration operand value定义compensators
- COMP: 设置compensator, Code=0,1,2分别表示 thickness, curvature,conic
- CPAR: 设置parameter 为compensator
- SAVE: 保存文件来评估前一行中的tolerance
- SEED: 为Monte Carlo分析产生随机数
- STAT: 为Monte Carlo分析选择分布类型
- TWAV: 设置试验波长。

进行tolerance analysis

- Tools>>Tolerancing>>Tolerancing



Mode

- **Sensitivity:** 计算公差极端情况下评价标准的改变量
- **Inverse Limit:** 计算评价标准变化量为指定值时的公差。标准的变化值由Limit定义。
- **Inverse Increment:** 计算标准的变化量为由Increment 定义值时的公差。
- **Skip Sensitivity:** 进行 Monte Carlo 分析。

Limit和Increment

- **Limit:** 用Inverse Limit时，用来定义评价标准的界限。例如,标准是RMS Spot Radius, 系统标称的RMS是0.035, 如果Limit设置为0.050,则ZEMAX计算RMS=0.050时每一个公差的最大和最小值。这个标称值可以点Limit边上的“?”号计算出来。
- **Increment:** 用Inverse Increment时，用来定义评价标准的增量。Increment必须为正，表示系统性能下降。
- **# Monte Carlo Runs:**定义运算的周期数。

Criteria

评价标准有6种情况:

- RMS spot size (radius, x或y):适于不接近衍射极限的系统(最快)。
- RMS wavefront: 适于接近衍射极限的系统(很快)。
- Merit Function: 适合于user-defined tolerancing criteria。
- Geometric or Diffraction MTF (average, tangential, or sagittal):适合于需要指定MTF的系统(计算最慢)。如果系统的OPD太大,则无法计算衍射MTF,所以有时候会有问题。
- Boresight error:瞄准误差是轴上视场主光线的径向角偏差。用BSER operand表示。只用于radially symmetric系统。User Script:macro-like command file。

Tolerancing

- MTF Frequency: MTF的频率。单位line/mm。
- Sampling: 设置追迹的光线的数目。
- Config: multi-configuration lenses 公差分析
- Comp: 控制如何评估compensators。“Optimize All”用优化功能确定所有定义的compensators的最佳值。
“Paraxial Focus”只用于近轴后节距为compensator的情况下。

Fields

- 在构建公差分析的merit function时，有3种不同的视场设置：
- Y-Symmetric: 缺省旋转对称系统。先计算最大视场，然后定义Y方向上的+1.0, +0.7, 0.0, -0.7, 和-1.0视场。
- XY-Symmetric: 9个视场：5个Y视场再加4个X视场： -1.0, -0.7, +0.7, 和+1.0。
- User Defined: 自定义的所有视场。有vignetting factors, 分析多重结构或使用tolerance scripts, 非旋转对称系统，自定义的视场的权重比较复杂时，选择这一项。

其它

- **Separate Fields/Configs:**单独计算所有结构的所有视场的评价标准。否则计算它们的平均值
- **Script:** User script文件名。
- **Force Ray Aiming On:**计算更精确，但更慢。
- **Show Compensators:** 打印compensator values。
- **Statistics:** 在Monte Carlo 分析时，选择 Gaussian “normal”分布，“uniform”，or “parabolic” 分布。

Summary

- 公差分析程序非常灵活，功能强大。在计算公差时，ZEMAX不用任何的近似、外推或估算。因此对常规系统和复杂系统都可以给出很好的结果。
- 因为公差分析是个复杂的过程，所以ZEMAX也不敢保证完全正确，所以设计者有必要对结果进行校验。

公差分析练习

- 打开ZEMAX中的Double Gauss.zmx镜头，分别用二种模式分析其公差：
 - (1)用Sensitivity模式分析各个曲率半径公差为0.2mm时，RMS Spot Radius的变化范围；
 - (2)用Inverse limit模式分析RMS Spot Radius为8时，各个参数的公差容限值。

COORDINATE BREAKS

Local vs. Global coordinates

在ZEMAX的Lens Data Editor中，即Sequential中时，各个面的数据：

- 只用Local coordinates;
- 每个面的位置都是通过沿z方向的距离（即thickness）定义的；
- 尽管ZEMAX能够计算任何面对其它面的global coordinates,但所有的面都是用local coordinate定义的；

在Non-sequential Editor中：

- 所有的objects处在global coordinate坐标系中。

什么是COORDINATE BREAKS

- COORDINATE BREAKS (CB) 是一个特殊的虚拟面，用它定义一个新的坐标系，替代现有坐标系，定义新的光轴。
- CB有6个自由度：
 - (1)Decenter X
 - (2)Decenter Y
 - (3)Tilt about X
 - (4)Tilt about Y
 - (5)Tilt about Z
 - (6)The order flag

所有的Decenter和Tilt是按上面的顺序从上到下进行的，如果flag是非0数，则顺序相反。

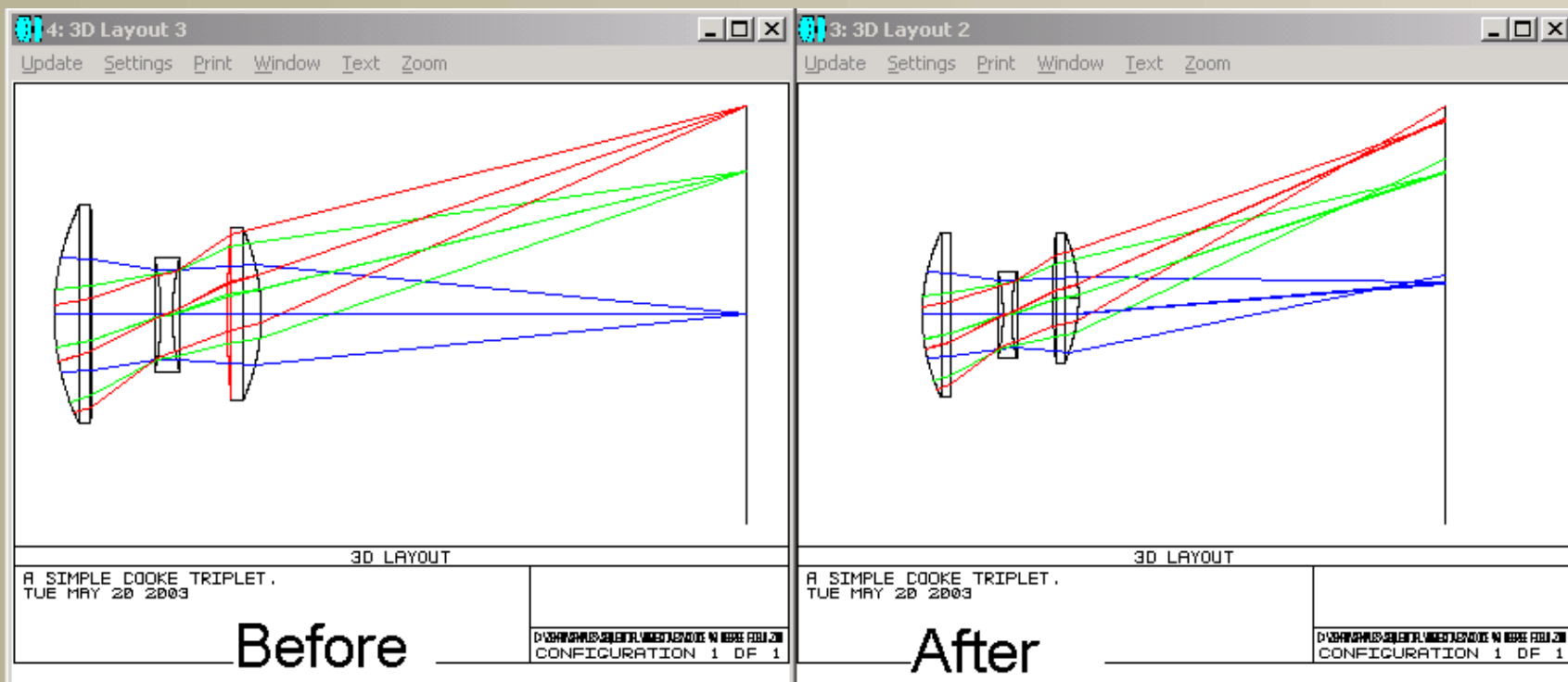
Decenter

- 打开file :cooke.zmx,假定要把最后一个透镜往Y方向移2mm。
- 做法如下:
 - (1) 在surface 5前面插入一个面, 其surface type 为coord break;
 - (2) 在decenter Y中输入2;
 - (3) 在surface 7前面插入一个面, 其surface type 为coord break;
 - (4) 在decenter Y中输入-2。

注: 第2个coord break是将偏移的透镜后面的系统回归到原位。

Before and After decenter

- 下面是偏移前后的系统3D layout图。

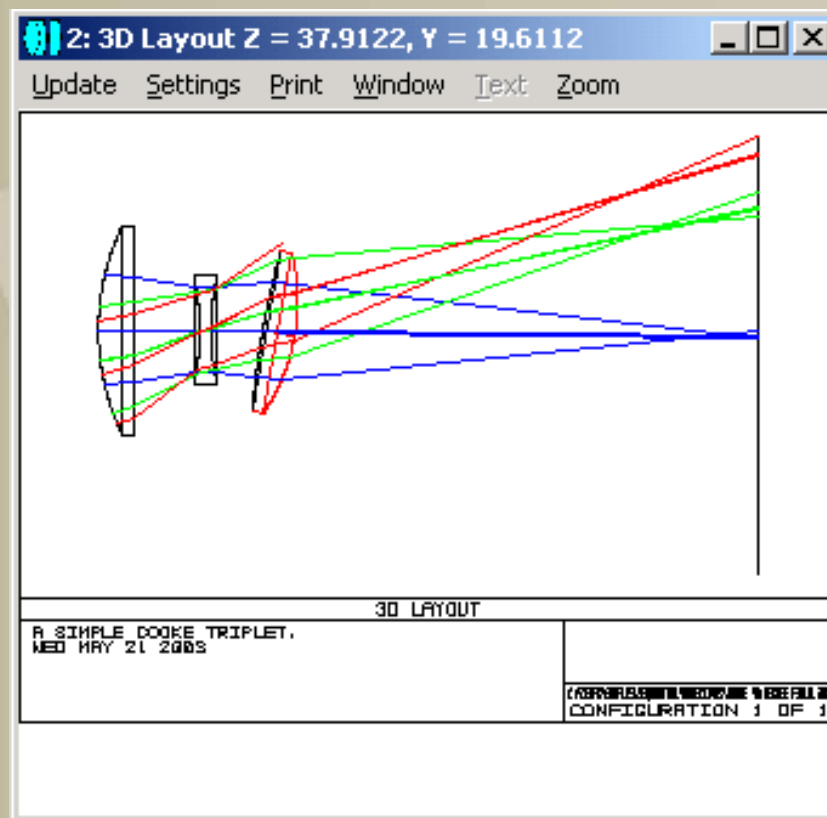


Tilts

- 打开file :cooke.zmx,假定要把最后一个镜片倾斜。
- 做法如下:
 - (1) 在上个例子的基础上, 先将decenter全部设置为0;
 - (2) 在surface 5上将tilt about x设置为+10 (单位为度);
 - (3) 在surface 8上将tilt about x设置为pick up (from surface:5;scale factor:-1);使像面保持直立
 - (4) 在surface 8上将thickness设置为marginal ray height以保持像面在焦面上。

After Tilt

- 尽管镜片倾斜，但像面保持不动。



Tilts and Decenters

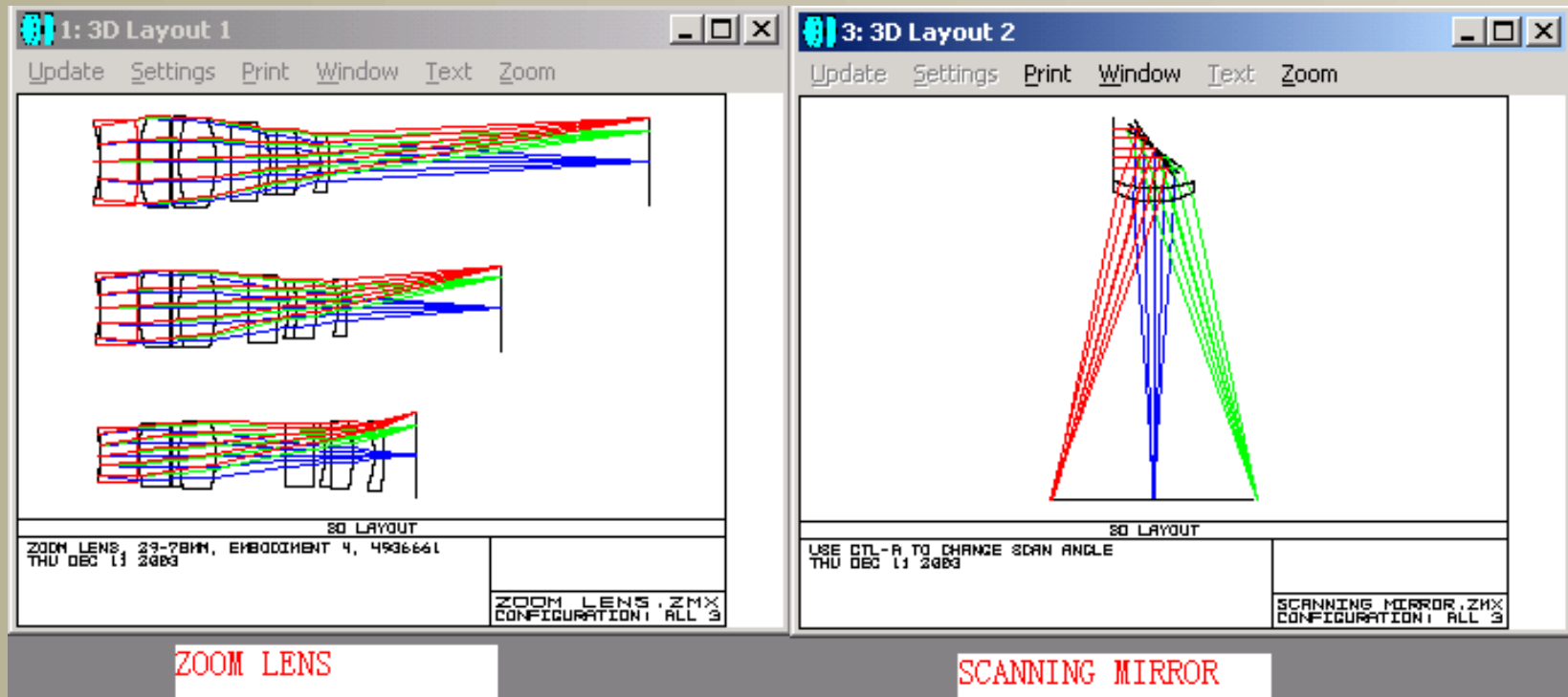
- 上面的例子只是单纯的Tilts或Decenters。如果同时都存在就会很复杂，还需要考虑它们的顺序。
- CB在使用时容易搞糊涂，所以在使用以前应该仔细规划。使用好CB，可以使复杂的设计变得简单。
- 使用时需要注意几点：
 - (1) 在使用多重CB时，要注意嵌套，
 - (2) 成对的CB尽量用pick up，这样可以减少输入和可能的错误，
 - (3) 如果同时有Tilt和Decenter，可以用order flag控制顺序，
 - (4) 如果因为Tilt使厚度的方向发生改变时，要注意符号的变化。

Multi-Configuration

Introduction

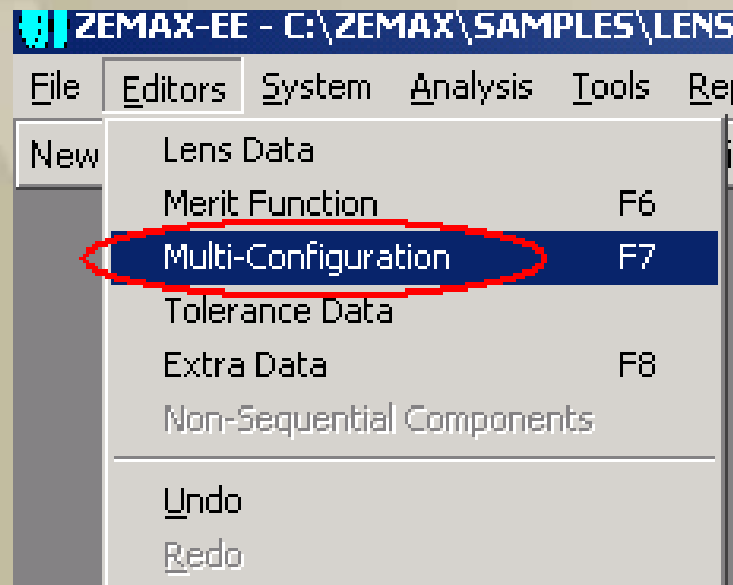
- 什么是Multi-configurations系统？是用1重以上的结构建模的系统，通过多重结构给同一个参数不同的值。
- 用途：
 - (1) 设计zoom lenses：元件的位置不同；
 - (2) Athermalized lenses：温度和压强不同；
 - (3) 多光路系统：透镜阵列、干涉仪、分光镜等；
 - (4) 扫描系统： polygon scanner；
 - (5) switchable component系统：非连续变焦系统。

Multi-configuration samples



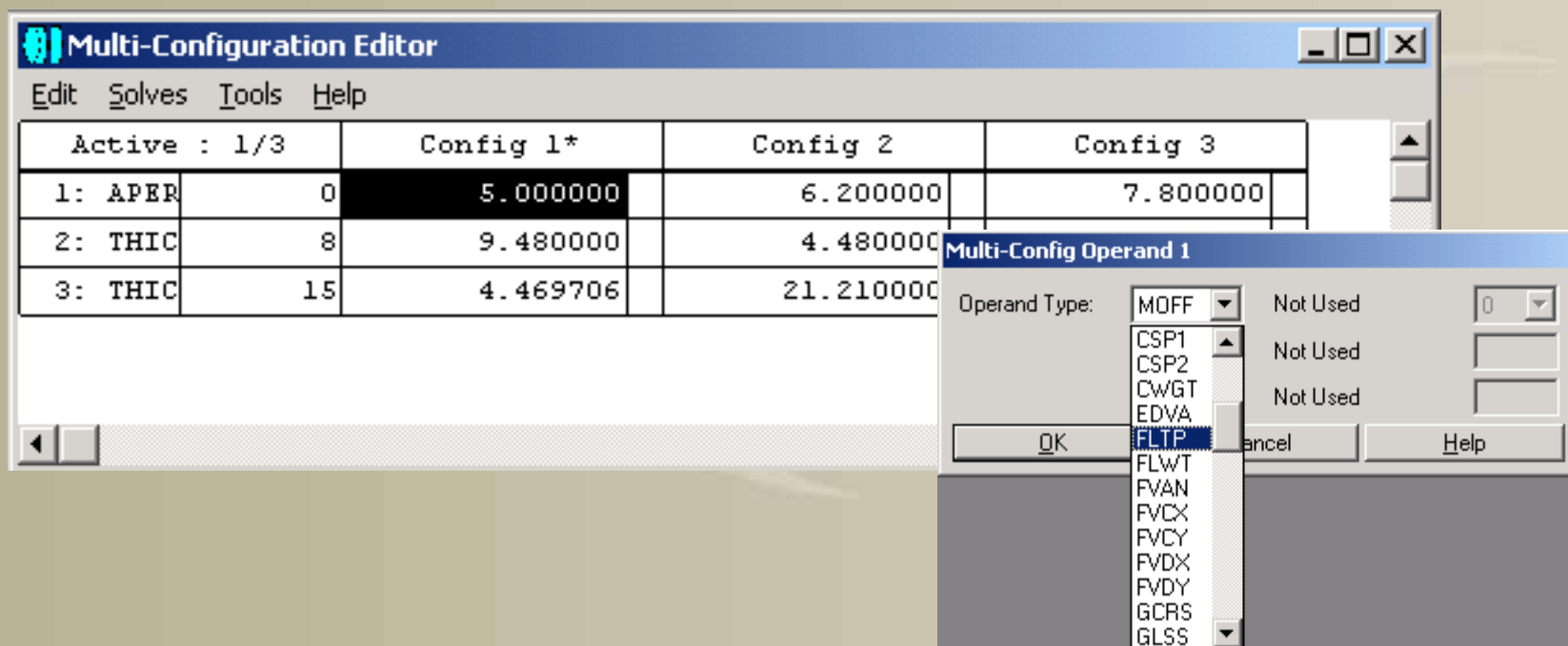
Multi-configurations的建立

- 先用常规的方法建立一个光学系统— basic configuration 。最好先建立最复杂的结构。
- 选择Editors>>Multi-Configuration，出现MCE，再用MC操作数建立多重结构。



Multi-Configuration Editor

在Edit中可以对config和operand的数目进行增减。要改变operand的类型，在type栏上双击，就会在Multi-config operands对话框中改变操作数的类型。



Multi-configurations的优化

- (1) multi-configuration data的优化和普通的优化是一样的。先用“Default Merit Function”建立优化函数，ZEMAX会自动在各个结构下面加入优化函数；在MCE中定义优化操作数为变量。
- (2) 用CONF操作数定义；可以给不同的结构定义不同的优化函数，但不同结构的优化函数必须分开放在CONF规定的结构号码下面；放置的方式有二种,它们的功能是一样的。

Multiple-Configuration merit functions

- CONF 1
- User operands for configuration 1...
- Default operands for configuration 1...
- CONF 2:
- User operands for configuration 2...
- Default operands for configuration 2...
- CONF 3:
- ...etc.

Multiple-Configuration merit functions

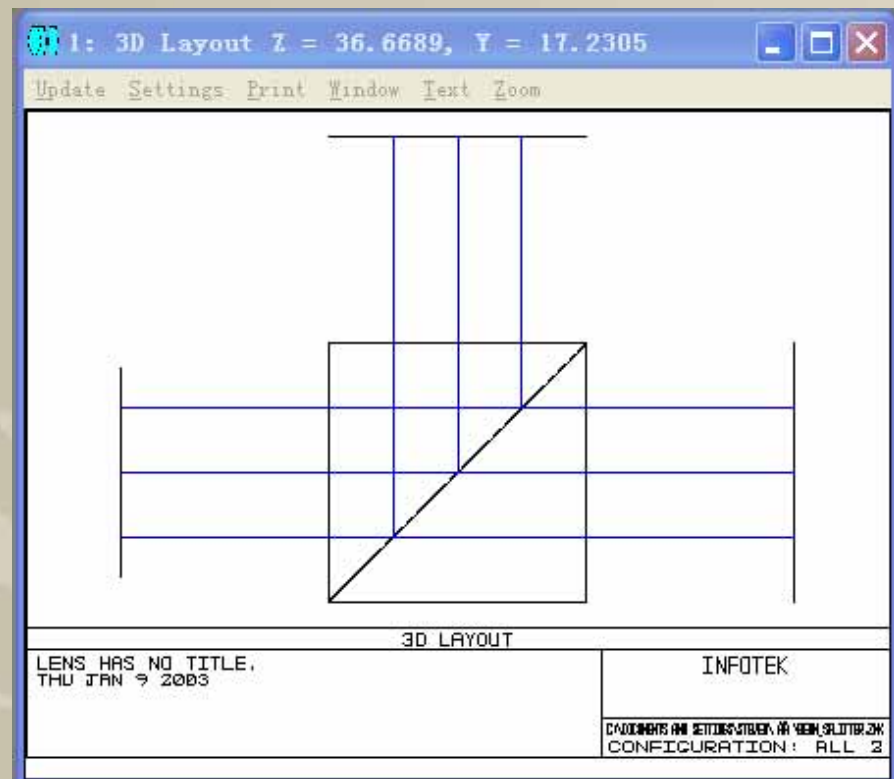
- CONF 1
- User operands for configuration 1...
- CONF 2
- User operands for configuration 2...
- CONF 3
- User operands for configuration 3...
- etc...
- DMFS
- CONF 1
- Default operands for configuration 1...
- CONF 2
- Default operands for configuration 3...
- CONF 3
- Default operands for configuration 3...
- etc...

Note

- 建立了缺省优化函数以后，它就与DMFS操作数关联，自己输入的操作数不会丢失。
- 如果在multiconfiguration中改变视场角、高度、权重或波长，则需要重建优化函数。

Multi-configuration应用例1: Beam Splitter

- 用multi-configuration的方法建立一个分光系统(Beam splitter)。
- 用二重结构, 分别建立二个光路。
- 目的: 熟悉multi-configurations的使用和设置。
- 建立一个Beamsplitter, 长宽高各为20mm, 光瞳为20mm, 如图所示。



设计步聚

- (1) 入瞳直径为50，视场为0度，物在无穷远处，波长为可见光；
- 在LDE中先建立三个面，每个面之间的距离为50，半径自定义为50，aperture type设置为矩形，长宽各为50；第一个面的材质为Bk7，第二个面的材质为MIRROR；
 - 在MIRROR前面加一个Coord Break面形，使第二个面旋转45度；再在它的后面加一个Coord Break面形，使后面的面转再45度；
 - 将Coord Break后面的距离数据改成负号，使后面的面处在正确的位置；

设计步聚

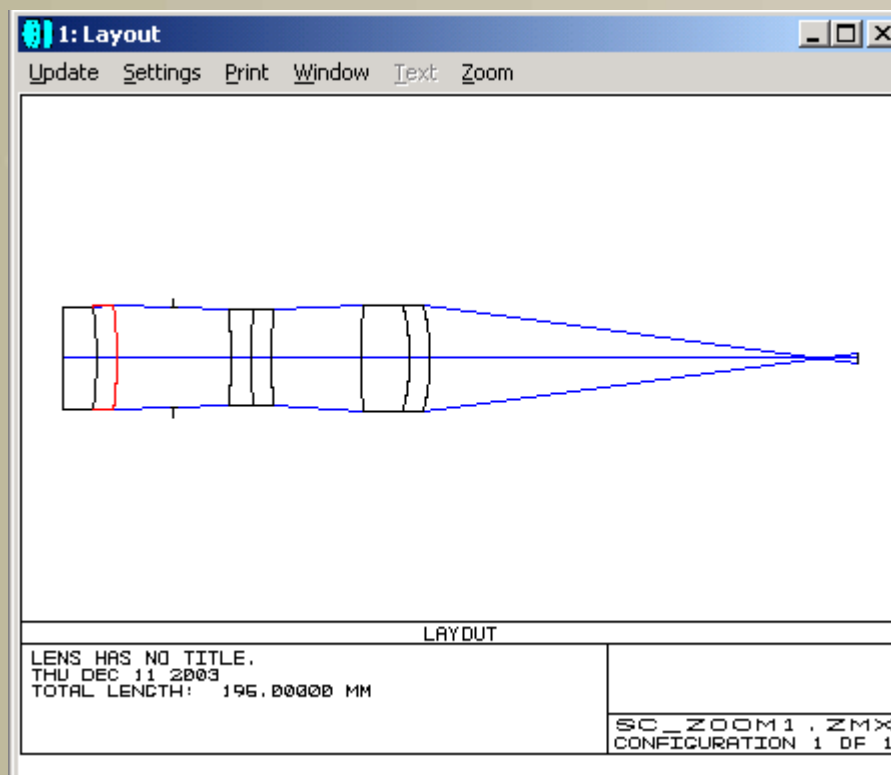
- (2) 打开Editors—Multi-Configuration, 出现MCE窗口, 增加一个 Configuration, 插入几个operands;
- (3) 用par3控制surface 3和5的旋转情况 (旋转角度由45度改为0度); 用THIC控制surface 2, 5和7的厚度 (符号由负变为正); 用GLSS将surface 4变为BK7;
- (4) 打开3D Layout, 按setting, 让二个结构同时显示出来, 就可以得到所要的结果。

Multi-configuration应用例2: ZOOM LENS

- Multi-configuration最常用的功能之一就是变焦镜头设计;
- 这个例子试图在变焦镜头系统的建立和优化方面进行练习;但复杂实用的变焦镜头需要很丰富的经验和相关的知识;
- 基本要求:
 - (1)3个变焦位置: 75, 100, 125mm EFL
 - (2)EPD固定为25mm(F/3,4,5)
 - (3)由3个group组成, 每个都是BK7/F2双胶合组合
 - (4)MNCT 2,MNET 2,MXCG 10
 - (5)Field:用paraxial image height :0,12,17mm
 - (6)wavelength:F,d,C

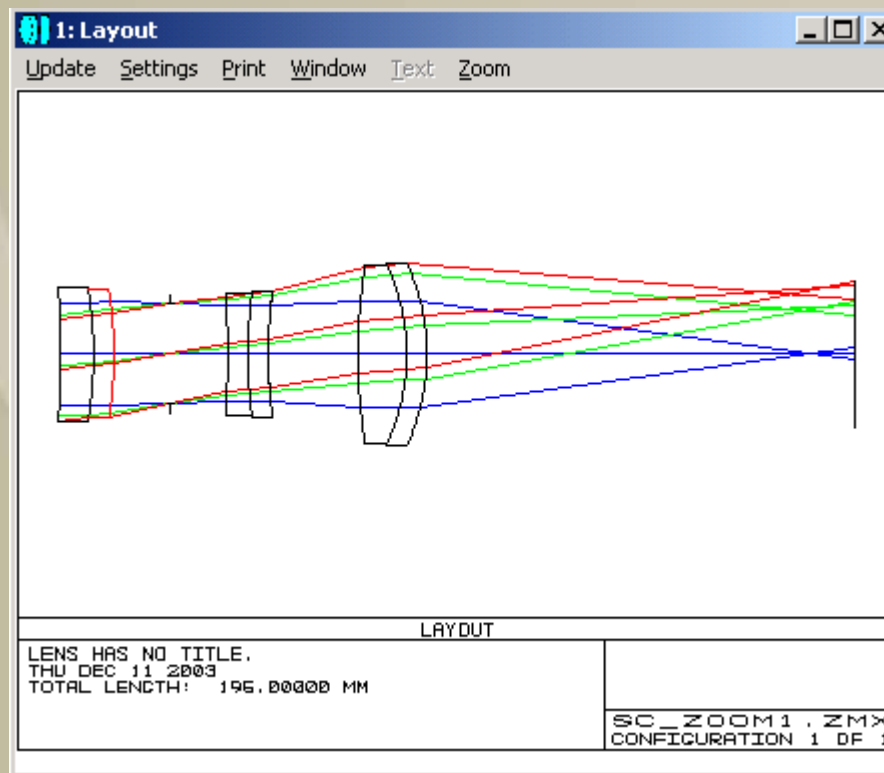
Starting Point

- 调出Zemax中的Samples\Short course\SC_ZOOM1.ZMX文件



Fields and Wavelengths

- 加入三个视场：近轴像高：0，12，17mm
- 加入F,d,C波长



ZOOM LENS TECHNIQUE

- 变焦镜头设计时有一些基本的原则：
 - (1) 变焦过程中，透镜的曲率半径是不变的，所以不能使用 Curvature solve。必须用EFFL优化操作数控制焦距；
 - (2) 每一个zoom position由一个configuration定义。它们有自己的优化函数和边界条件；这里需要3个configurations
 - (3) 透镜的直径由所有configuration中所需要的最大值确定。可以用“Maximum” solve。

编辑Multi-Configuration

- 打开multi-configuration editor(MCE);
- 插入3个configurations;
- 插入4行。用相关操作数定义不同结构之间参数的变化。这里使3, 4, 7, 10个面的厚度发生变化。用THIC操作数, ZEMAX会自动从LDE中得到相关的数据;
- 并将它们12个厚度全部设置为变量。

LDE and MCE

Lens Data Editor: Config 1/3

Edit Solves Options Help

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
1	Standard		-187.800626 V	8.000000 V	BK7	16.410914 M	0.000000
2	Standard		-98.235380 V	5.000000 V	F2	15.806393 M	0.000000
3	Standard		-98.235380 V	14.000000 V		15.480130 M	0.000000
ST0	Standard		Infinity	14.000000 V		12.348226 M	0.000000
5	Standard		-178.895703 V	5.000000 V	BK7	14.237206 M	0.000000
6	Standard		120.820139 V	5.000000 V	F2	15.016916 M	0.000000
7	Standard		120.820139 V	22.000000 V		15.544887 M	0.000000
8	Standard		130.501532 V	12.000000 V	BK7	21.427225 M	0.000000
9	Standard		-53.284803 V	5.000000 V	F2	22.010948 M	0.000000
10	Standard		-53.284803 V	105.000000 V		22.613294 M	0.000000
IMA	Standard		Infinity	-		17.922122	0.000000

Multi-Configuration Editor

Edit Solves Tools Help

Active : 1/3

	Config 1*	Config 2	Config 3
1: THIC	3 14.000000 V	14.000000 V	14.000000 V
2: THIC	4 14.000000 V	14.000000 V	14.000000 V
3: THIC	7 22.000000 V	22.000000 V	22.000000 V
4: THIC	10 105.000000 V	105.000000 V	105.000000 V

Merit Function

- 定义缺省优化函数：
 - (1)RMS Spot Radius
 - (2)glass boundary: 2-10-2
 - (3)air boundary: 0-1000-0
- 自定义优化函数：在每个CONF下面加入EFFL操作数
 - (1)EFFL 2 75 1
 - (2)EFFL 2 100 1
 - (3)EFFL 2 125 1

Variables setting

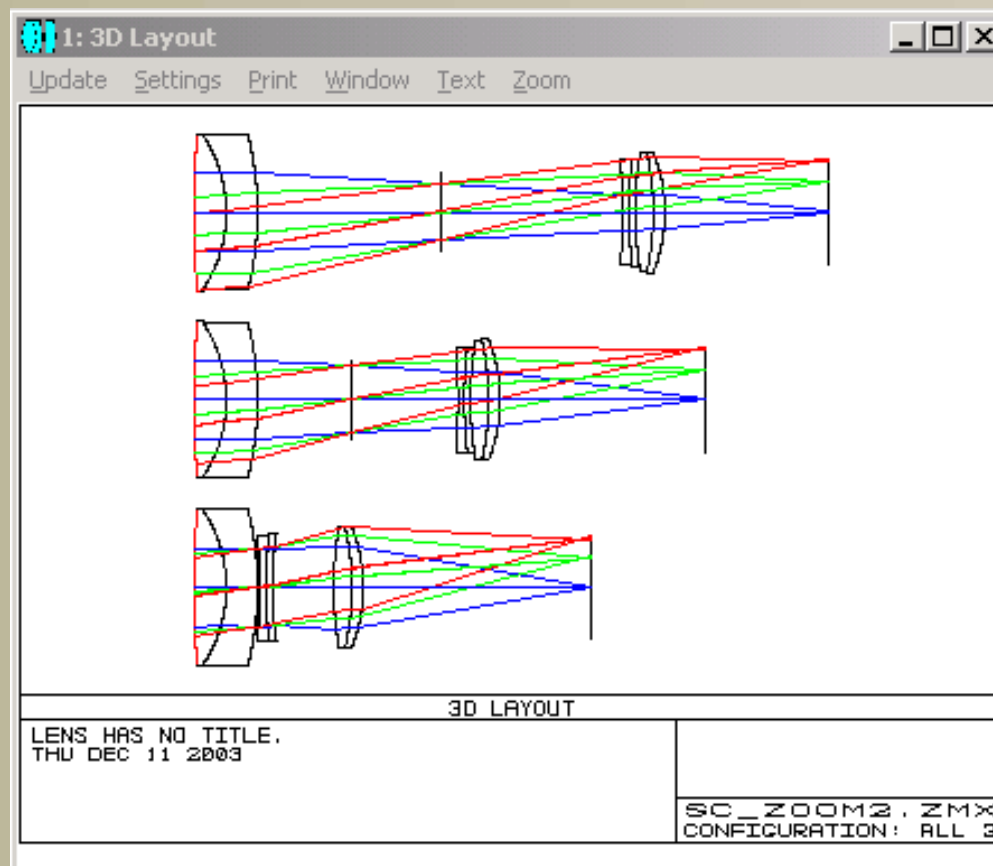
- 变量设置：
 - (1)所有9个曲率半径
 - (2)玻璃的6个厚度
 - (3)MCE中的12个间隔共27个变量。

Control the Semi-diameters

- 要告诉ZEMAX，在三个变焦位置中，所有孔径的都要取三个结构中最大的一个值：
 - (1) 在每个面的semi-diameter上用“maximum” solve(不包括光阑面);

Possible design

可能的
设计结果



Discussion

- 这里的目的是为了让大家了解ZEMAX的使用，所以结果不一定好。而且我们在几个变焦间隔上也没有设置边界条件，所以有时候甚至可能得到不合理的结构；
- 如果要得到合理的结构，可以再增加一些约束，再用Hammer优化来寻找到列好的设计结果；
- 还可以考虑加一些渐晕、对玻璃进行优化等。
- 可以用Ctrl+A在不同结构之间转换。

Non-Sequential

Introduction

- 实际的透镜，不但有前后面，还有边沿部分。光线会在同一个面上反射、折射或散射，光线不再按LDE中的surface顺序传播，而是按实际顺序传播；
- Non-sequential就是光线的追迹是按它打到各个面上的实际顺序，而不是按LDE中放置的顺序；
- 在non-sequential追迹中，光线可能会多次打到同一个物件上。要求non-sequential追迹的物件有faceted objects, prisms, light pipes, lens arrays, reflectors, and Fresnel lenses等；
- 有些类型的分析，如stray或scattered light 效应，只能在完全non-sequential环境中进行。

Non-sequential components (NSC)

- 用完全3D固体模型代替2D面，这些固体称为 non-sequential components(NSC)。 NSC光线追迹支持下列功能：
- 定义和放置多个sources、objects and detectors，
- 使用实际的辐射度和光度单位，包括watts, lumens, lux, phot, footcandles等，
- 自动确定ray-object相交的顺序，
- 自动探测reflection, refraction和 total internal reflection (TIR)，
- 支持3D objects，包括diffractive optics，
- 支持偏振光追迹和薄膜，散射的统计模型，包括Lambertian, Gaussian和Abg。

Paraxial ray tracing with NSC

- 在NSC中，没有近轴光线追迹。
- 当近轴光线追迹到一个non-sequential surface时,用等效的实际光线代替。因此，在NSC系统中，几乎所有的近轴数据，如焦距和F/#,都没有意义。

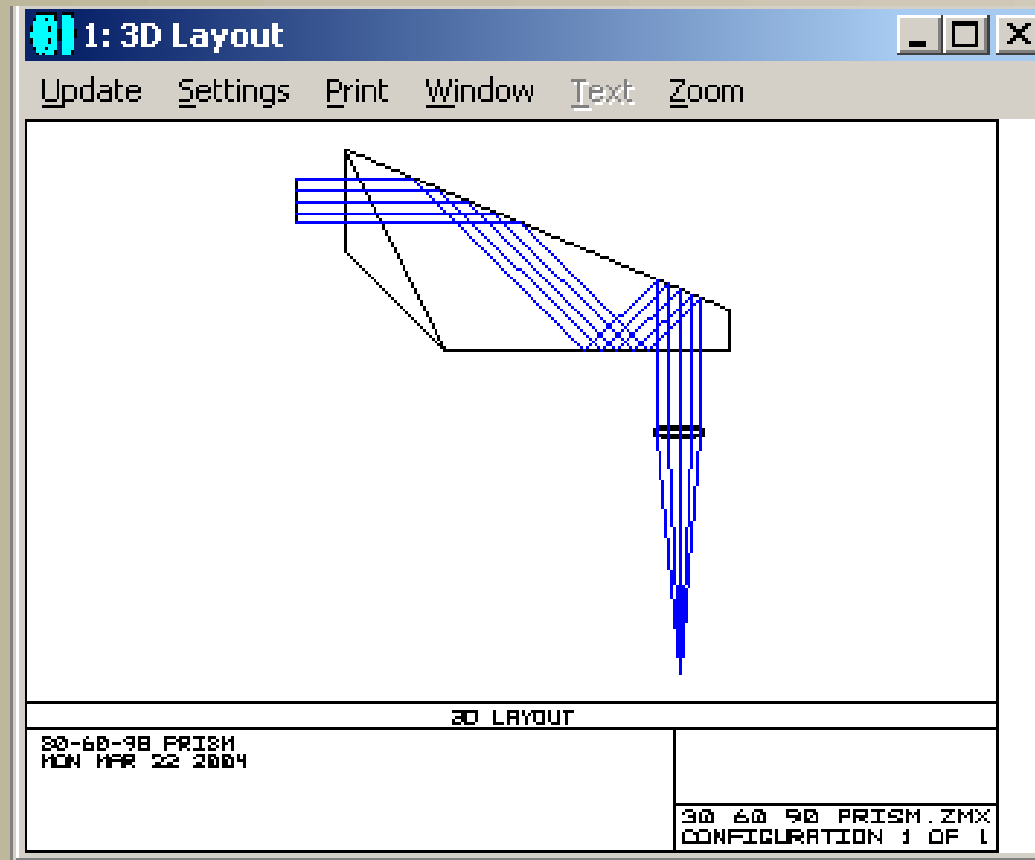
NSC ray tracing 的2种方法

- NSC with ports: 考虑的NSC group是sequential system一部分;
- NSC without ports: 考虑的NSC group包含所有objects;
- 2种方法中, 定义和放置NSC group内的objects的方法是一样的, 但具体分析和计算方法是不同的。其主要区别是光线发射和分析功能不同:
 - (1)NSC with ports, 所有光线从物面上定义的场点发出, 然后追迹到NSC group的entry port, 通过exit port离开NSC group, 再经过其它的sequential system.
 - (2)NSC without ports, 没有上面的限制, 可以在NSC group内任意定义和放置光源。

NSC with ports

- 忽略sources和detectors，考虑entry和 exit ports；
- 例如：几个传统的镜头，后面是棱镜或光管，这样一个系统就要用NSC with port。
- 所有sequential 系统数据，如视场和入瞳大小，决定进入NSC group的光线的特性。可以进行如ray fans, spot diagrams, 和 MTF的分析,进行分析时，只考虑通过port进出NSC group的光线。

NSC with ports example-30 60 90 prism



NSC ray tracing with ports的步聚

- 1) 将一个Non-Sequential Components surface插入到Lens Data Editor, 这个面就是NSC group的entry port。
- 2) Non-Sequential Components surface后面的参数定义NSC group的exit port的位置。
- 3) Objects的位置在Non-Sequential Components Editors中定义(相对于entry port)。
- 4) 从entry port进入NSC group的光线不能分裂或散射。

Entry port的位置

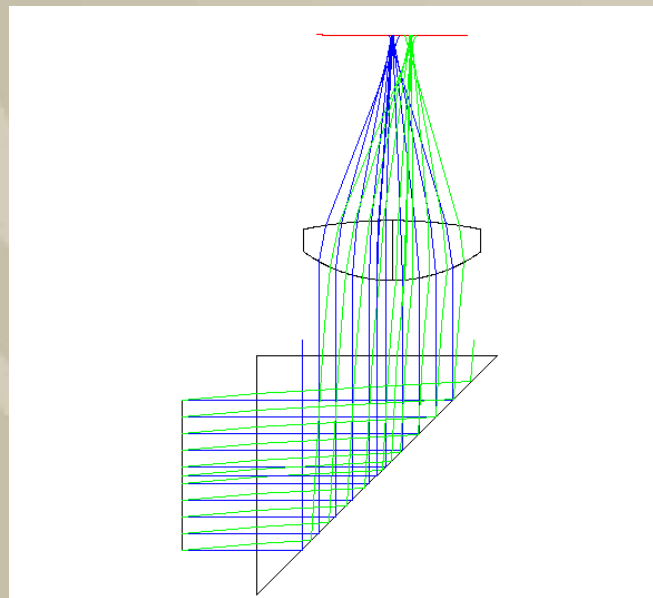
- The Non-Sequential Components surface可以是平面、非球面或二次曲面，它的位置一般是由LDE中前面的面决定的。它是一组objects的entry port。

Exit port的位置

- Non-Sequential Components surface的参数决定exit port 的位置：
 - (1) Draw Ports?: 为0, 不画ports; 为1, 画entry; 为2, 画exit; 为3, 都画。
 - (2) Exit Location X/Y/Z: exit port相对于entry port的坐标;
 - (3) Exit Tilt About X/Y/Z: exit port绕X/Y/Z轴的放置角度;
 - (4) Order: 0(decenter x/y/z, rotate around global z/y/x); 其它值(顺序相反)。
 - (5) Reverse Rays: 0: 假定non-sequential group是折射透镜; 1: 假定non-sequential group是反射镜。

练习：建立A Mixed System

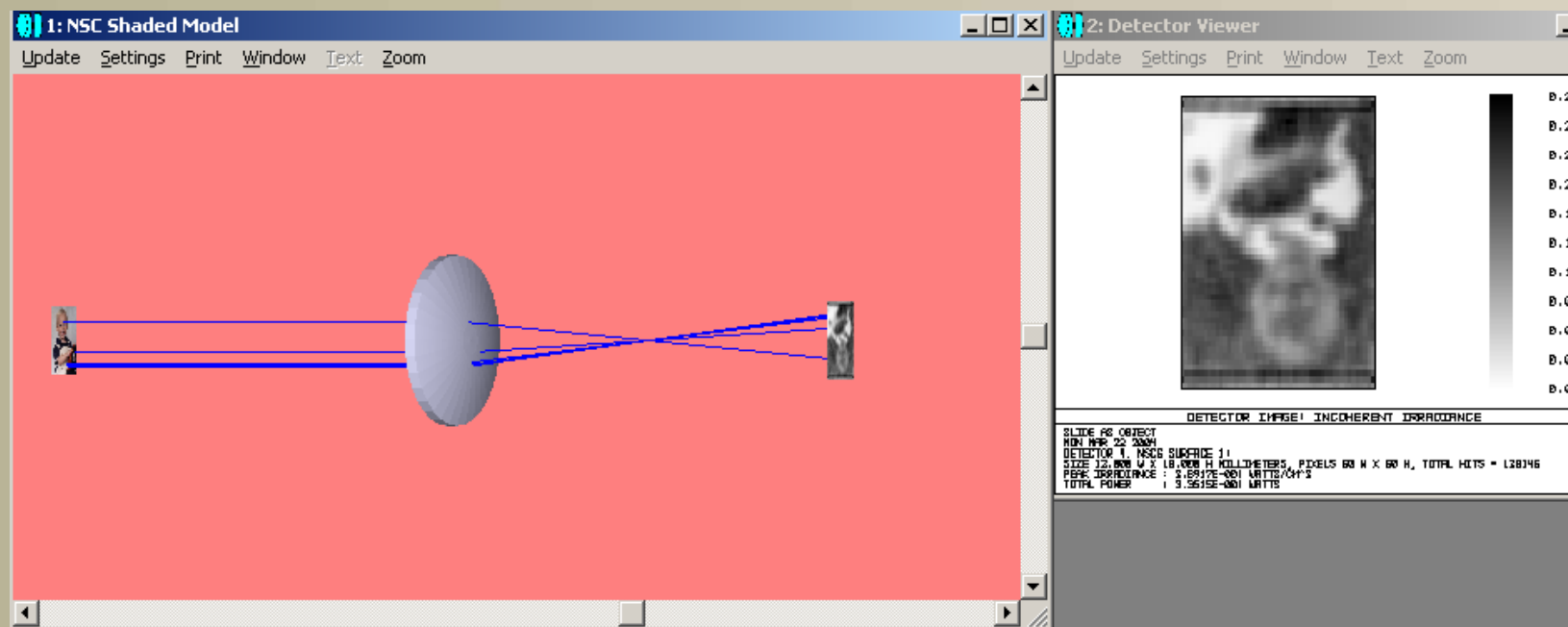
- 目的：练习mixed sequential的使用；
- 要求：建立一个系统。EPD=10mm, FOV=0,5度, 波长=F,d,C, Lens和Prism45的材料皆为BK7,Prism45的大小为8mm,
- 结构如下图所示：



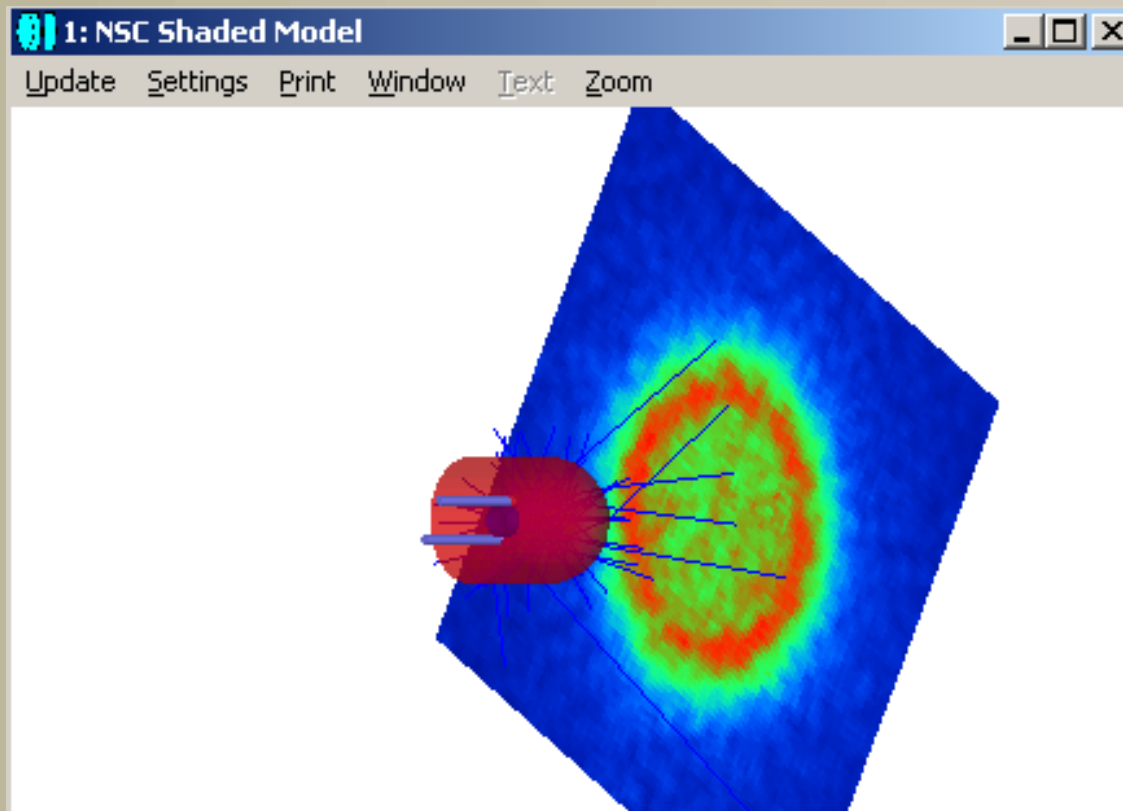
NSC without ports

- 考虑sources和detectors，忽略entry 和exit port。
- 系统里没有sequential paths或部分sequential paths，如headlamp reflectors，complex light pipes或general illumination systems，这时候使用NSC without ports 。
- 通过将整个系统(如相机或望远镜)放入一个non-sequential group 中，进行non-sequential光线追迹，还可以分析sequential systems 中的ghost，stray和scattered light的特性。
- 能提供的分析功能有：光线分布和detector记录的能量。

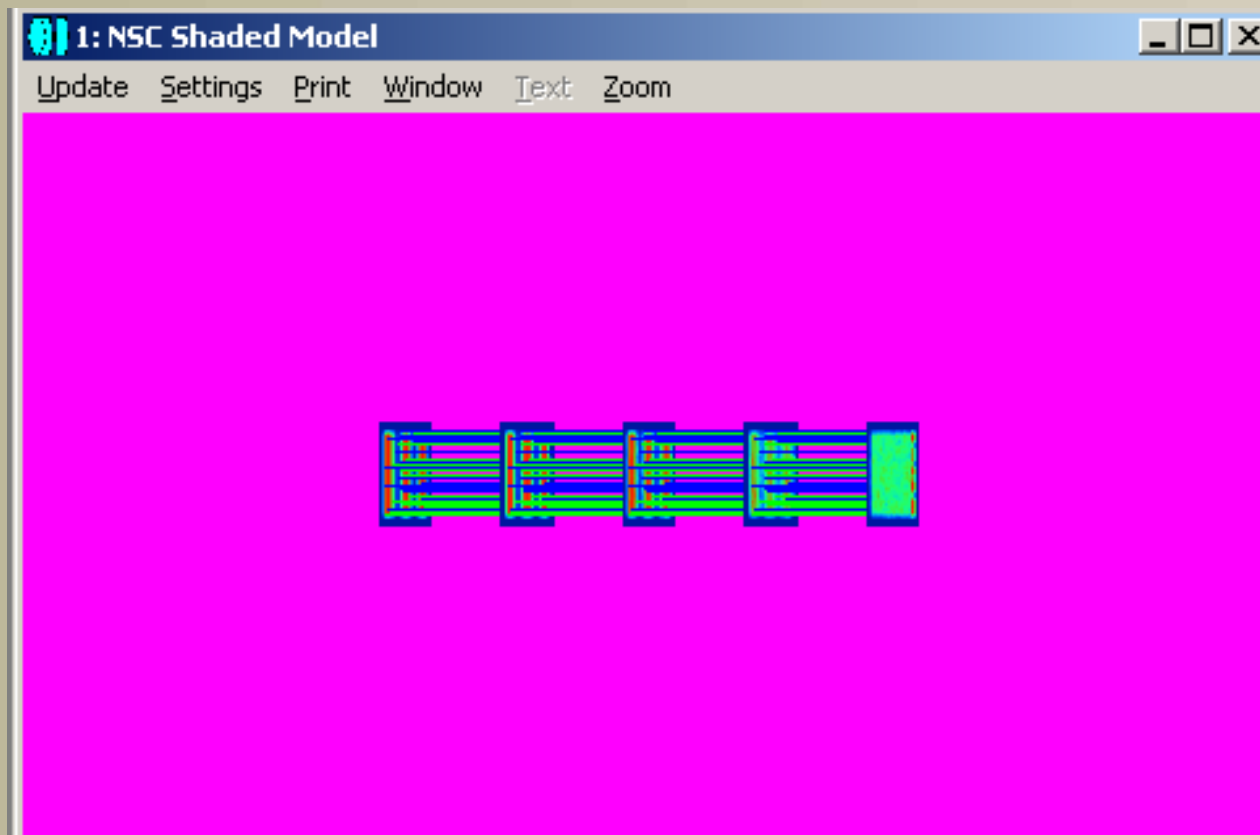
Pure NSC Example-Slide



Pure NSC Example-LED



Pure NSC Example- Coherence length



NSC ray tracing without ports的步聚

- 1)将光线追迹模式转换为non-sequential;
- 2)将Object插入Non-Sequential Components editor中，一般是surface 1，但其在Lens Data Editor中的顺序并不重要。建议只用objects。
- 2)忽略Non-Sequential Components surface的参数;
- 3) Sources、objects和detectors在Non-Sequential Components editor中定义。
- 在NSC以外定义的参数有：波长、玻璃和镀膜。

Sources

ZEMAX支持point, rectangular, elliptical,user defined,和其它光源模型。每个光源定义以下参数:

- # Layout Rays:在建立layout plots时, 定义有多少光线从光源随机发出。
- # Analysis Rays:在分析时, 定义从光源随机发出的光线数。
- Power (units):光源的总功率, 其单位由system source units确定。
- Wavenumber: 波数。0表示多色光;
- 注意: 多个光源会迭加, 产生多色光。光源可以放在任何位置。

Source Type

- (1) **Source Diode:** 可以定义一个diode, 一维diode阵列, 或二维diode阵列。每个光源都有一个光强分布;
- (2) **Source Ellipse:** 椭圆发光面;
- (3) **Source Filament:** 细金属丝环光源;
- (4) **Source File:** 用户自定义光源;
- (5) **Source Point:** 点光源, 锥形范围内发光;
- (6) **Source Ray:** 沿指定的方向余弦发光的点;
- (7) **Source Volume Cylinder:** 从内部任一点随机发光;
- (8) **Source Rectangle:** 矩形平面, 从虚拟点光源发光;

Source Type

- (9) Source Tube: 从表面发光;
 - (10) Source Volume Ellipse: 从内部任一点随机发光;
 - (11) Source Volume Rectangle: 从它部任一点随机发光;
 - (12) Source DLL: 用户自定义光源。
- Radiant Imaging light source: Radiant Imaging 公司的光源资料库。

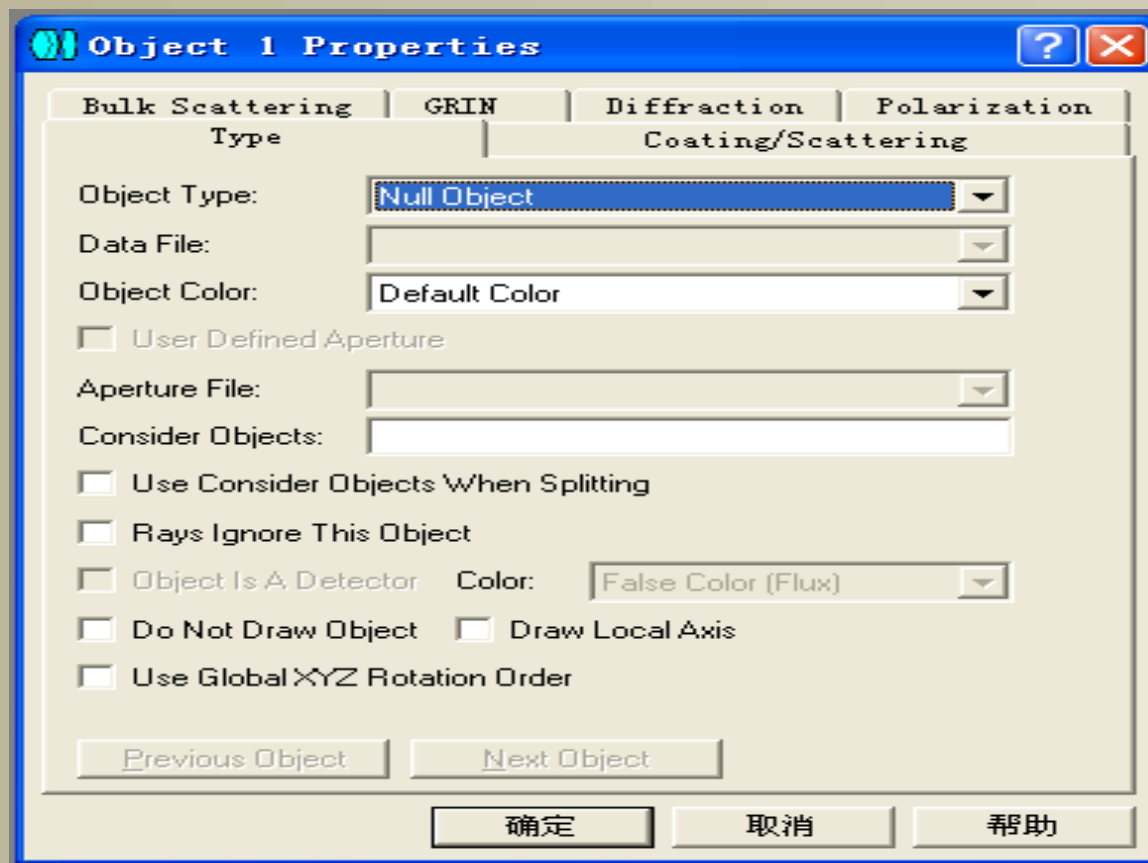
Detectors

- 有2种detectors:
- (1)矩形平面或曲面形状的专门探测器。
- (2)Object: 如prism 或aspheric surface。要使objects为detector, 在Object Properties>>Type中选择“Object Is A Detector”。
- Detectors 可以是absorbing, reflecting, transmissive或refractive。

NSC Objects

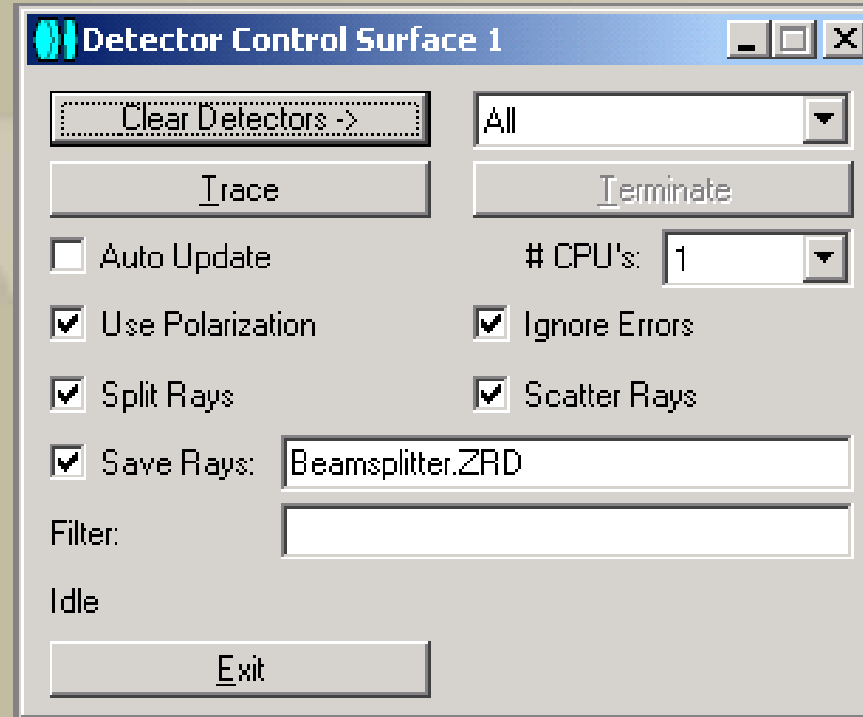
- NSC object types包括ellipses, triangles, rectangles, spheres, cylinders和其它基本形状。还有 arbitrary prisms, aspheric lenses, torics, toruses和其它复杂的形状。
- 根据定义的材质，可以是reflective, refractive, and absorptive。
- Objects可以以IGES, SAT或STEP这些CAD文件格式输入到ZEMAX中。要输入一个object，将object type设置为“Imported“，并从下拉菜单中选择文件名，或将文件名放在注释栏。文件必须放在\OBJECTS目录下。(但只能是solid)

Object properties



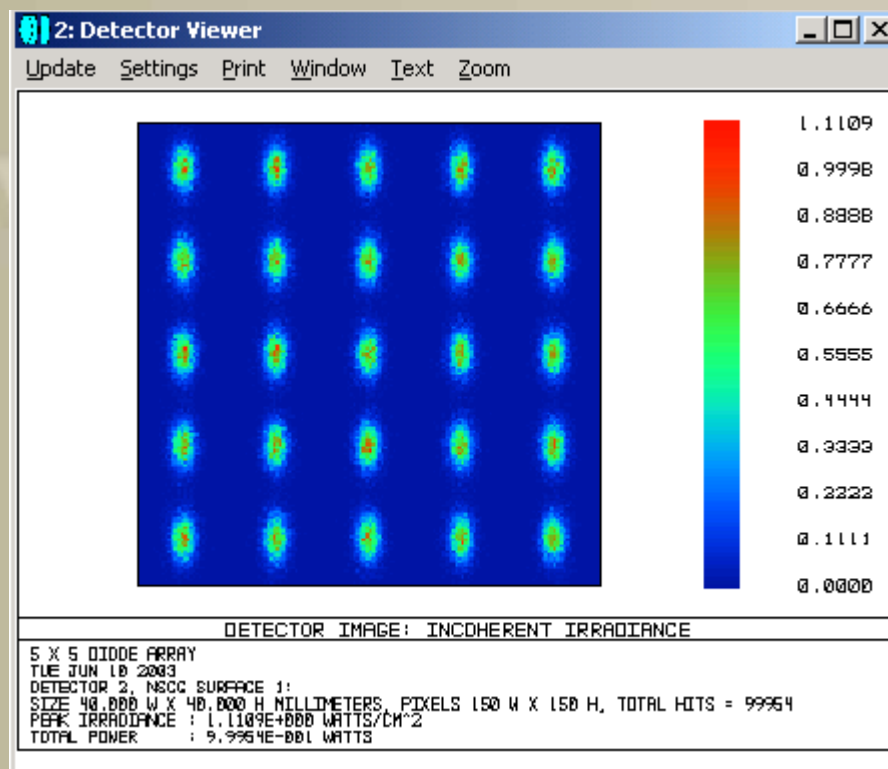
NSC Ray Trace

- NSC Editors>>Detectors>>Ray Trace/Detector Control
- 算法: *Monte Carlo*光线追迹,

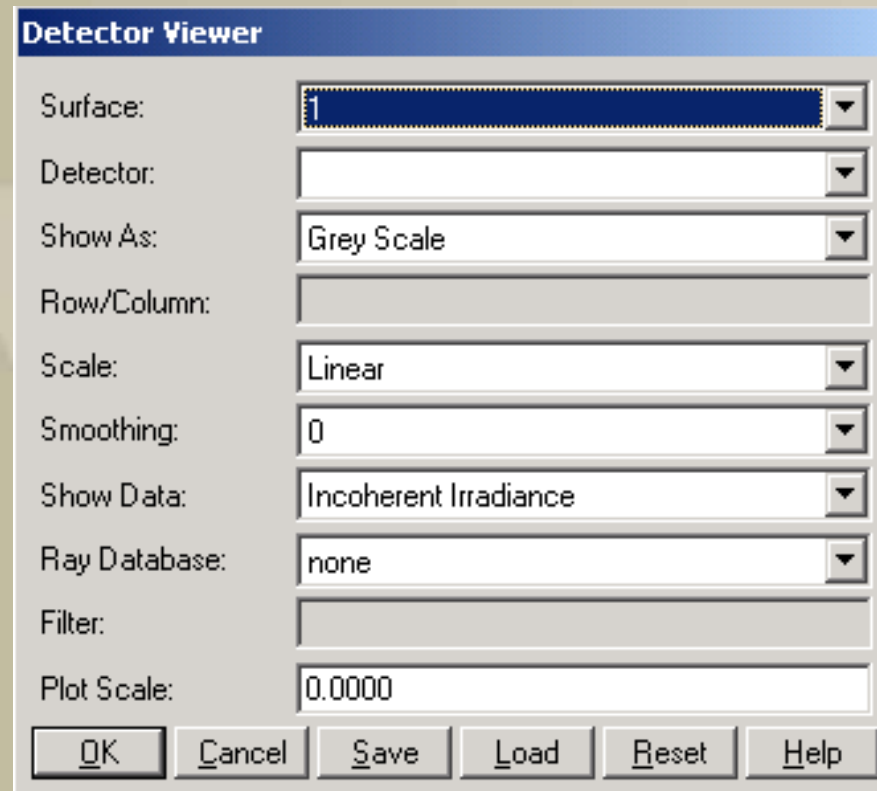


Detector Viewer Sample

- NSC Editors>>Detectors>>Detector Viewer



Detector Viewer Options

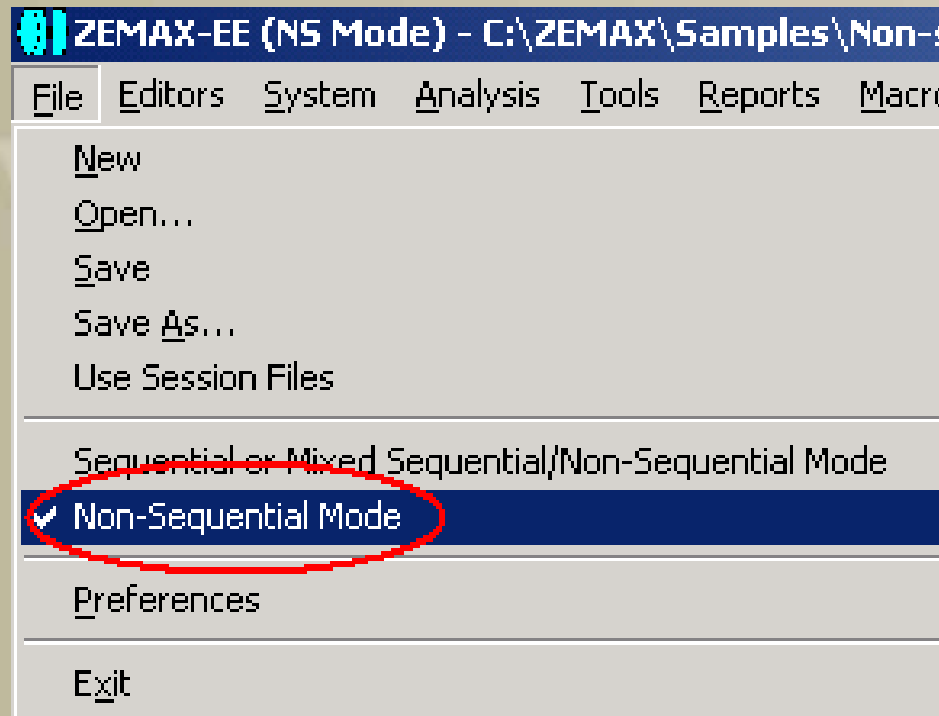


Show Data Type

- **Incoherent Irradiance:**单位面积上的非相干功率(照度)。每个像素上的功率是所有光线的和，不考虑位相因素。
- **Coherent Irradiance:**单位面积上的非相干功率(照度)。每个像素上的振幅是所有光线的复振幅之和。
- **Coherent Phase:** 相干发光中的复振幅和的位相角。
- **Radiant Intensity:** 单位立体角的功率(发光强度)，它对应入射到探测器的入射角。
- **Radiance (Position Space):**单位立体角的功率(亮度)，它对应探测器上不同点的空间位置。
- **Radiance (Angle Space):**单位立体角的功率(亮度)，它对应探测器上不同点的空间位置。

例1: Beam Splitter

- C:\ZEMAX\Sample\Non-sequential\Ray splitting\Beam Splitter
- 第一步: File>>Non-sequential Mode, 进入Non-sequential 模式。



第二步：建立Sources、Objects和Detectors

Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 1

Edit Solves Errors Detectors Database Help

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position
1 Source Elli..		0	0	0.000000	0.000000	35.000000
2 Poly Object	PRISM45.POB	0	0	0.000000	0.000000	50.000000
3 Poly Object	PRISM45.POB	0	0	0.000000	0.000000	70.000000
4 Detector Rect		0	0	0.000000	0.000000	120.000000
5 Detector Rect		0	0	0.000000	50.000000	60.000000
6 Detector Rect		0	0	0.000000	-50.000000	60.000000
7 Detector Rect		0	0	0.000000	0.000000	10.000000

Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 1

Edit Solves Errors Detectors Database Help

Object Type	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	# Layout Rays	# Analysis Rays
1 Source Elli..	5.000000	0.000000	0.000000	-	1	1
2 Poly Object	0.000000	0.000000	0.000000	BK7	10.000000	1
3 Poly Object	180.000000	0.000000	0.000000	BK7	10.000000	1
4 Detector Rect	0.000000	0.000000	0.000000	ABSORB	28.000000	28.000000
5 Detector Rect	90.000000	0.000000	0.000000	ABSORB	28.000000	28.000000
6 Detector Rect	90.000000	0.000000	0.000000	ABSORB	28.000000	28.000000
7 Detector Rect	0.000000	0.000000	0.000000	ABSORB	28.000000	28.000000

LDE

Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 1

Edit Solves Errors Detectors Database Help

Object Type	Power (Watts)	Wavenumber	Color #	X Half Width	Y Half Width	Source Distance
1 Source Elli..	1.000000	0	0	0.000000	0.000000	100.000000
2 Poly Object						
3 Poly Object						
4 Detector Rect	25	25	0	2	0	0
5 Detector Rect	25	25	0	2	0	0
6 Detector Rect	25	25	0	2	0	0
7 Detector Rect	25	25	0	2	0	0

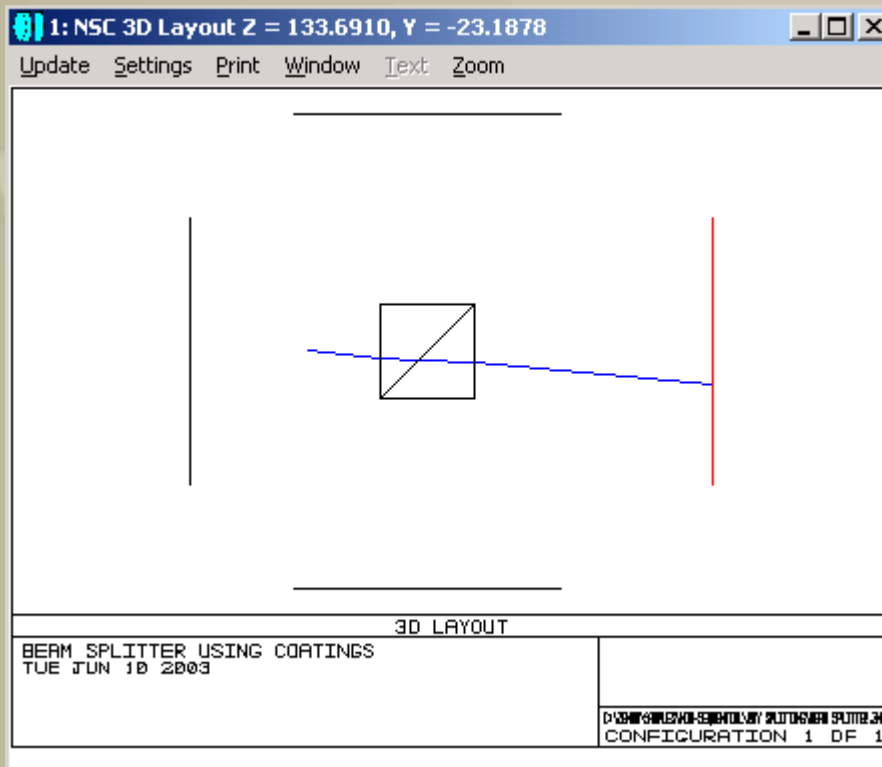
Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 1

Edit Solves Errors Detectors Database Help

Object Type	Front Only	PSF Wave#	X Angle Min	X Angle Max	Y Angle Min	Y Angle Max
1 Source Elli..	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
2 Poly Object						
3 Poly Object						
4 Detector Rect	0	0	-90.000000	90.000000	-90.000000	90.000000
5 Detector Rect	0	0	-90.000000	90.000000	-90.000000	90.000000
6 Detector Rect	0	0	-90.000000	90.000000	-90.000000	90.000000
7 Detector Rect	0	0	-90.000000	90.000000	-90.000000	90.000000

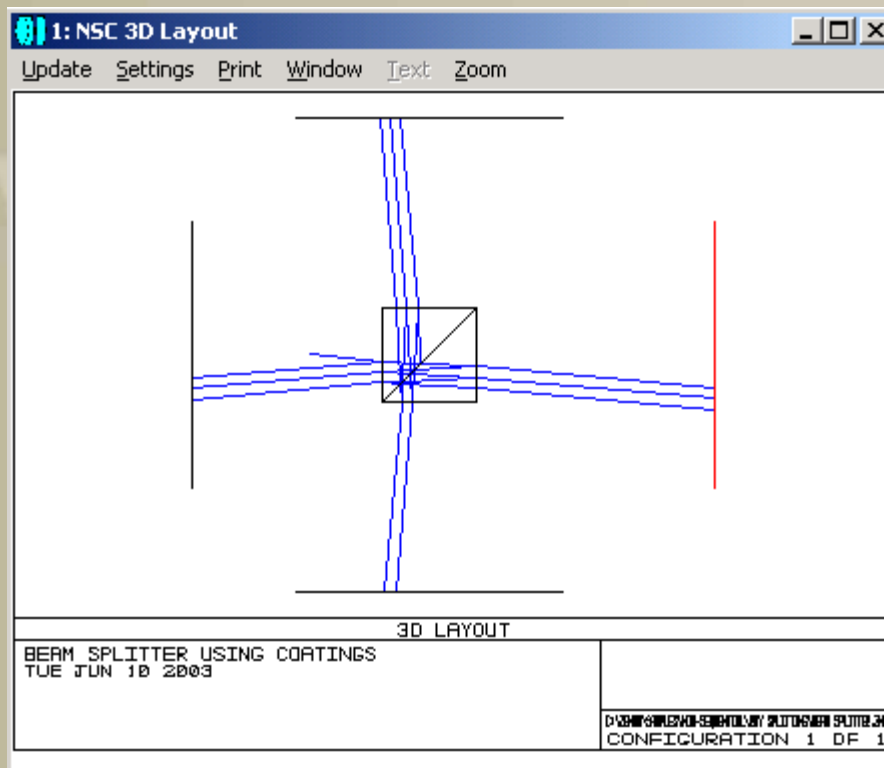
3D Layout

- No Split rays

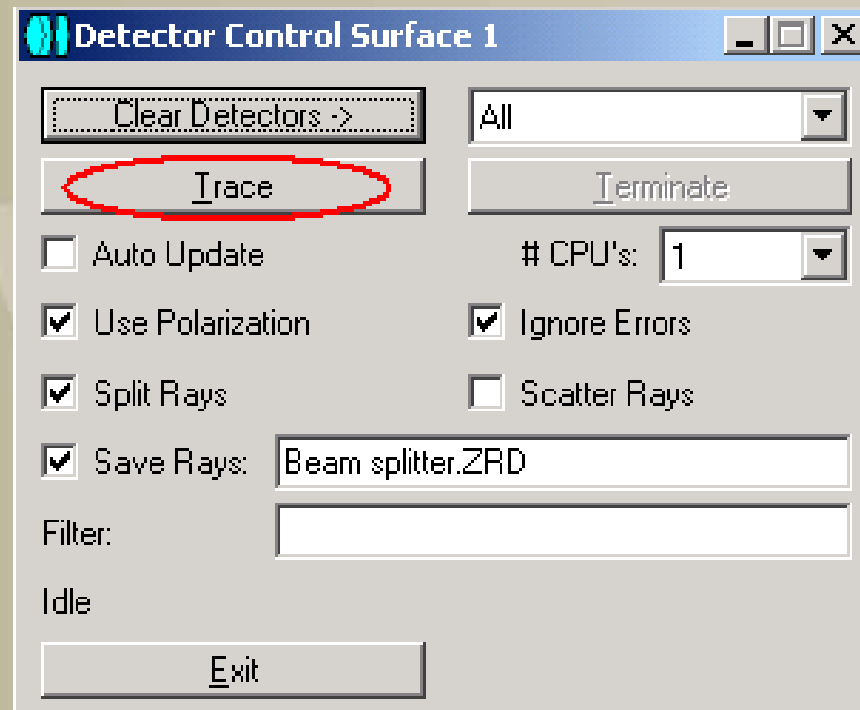


3D Layout

- Split ray

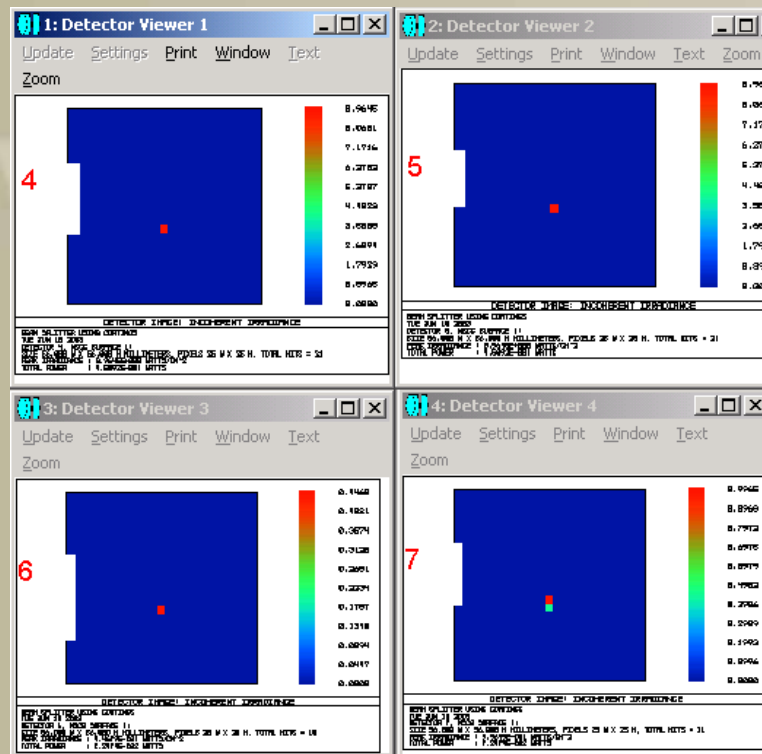


Ray Trace



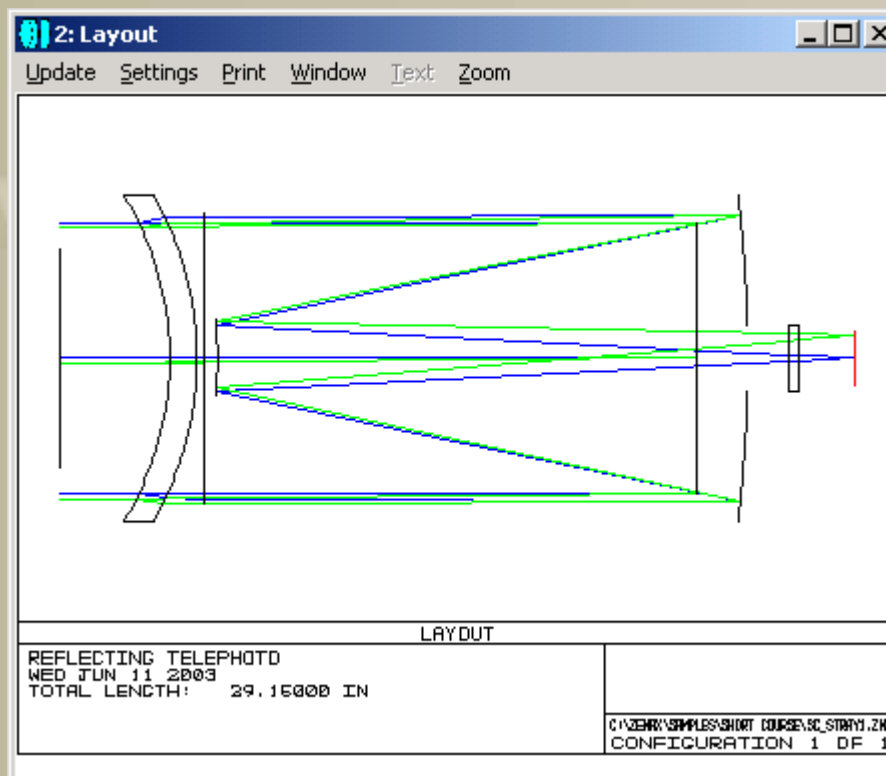
Detector Viewer

- 不同Detector上的结果。



例2: Stray Light分析

- 一个反射式天文望远镜的结构，如下图。



LDE

- 它所对应的LDE数据为(C:\ZEMAX\Samples\Short Course\Sc-Stray1)

Lens Data Editor							
Edit Solves Options Help							
Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
1	Standard		Infinity	-23.402100		5.000000	0.000000
2	Standard		Infinity	4.000000		4.000000 U	0.000000
3*	Standard		-11.559721 V	1.000000	K5	6.000000 U	0.000000
4*	Standard		-12.146827 V	0.250000		6.000000 U	0.000000
5*	Standard		Infinity	20.000000		5.337169	0.000000
ST0*	Standard		-49.673487 V	-19.500000	MIRROR	6.000000 U	0.000000
7*	Standard		-15.757889 V	21.000000	MIRROR	1.400000 U	0.000000
8*	Standard		-26.304463 V	0.400000	K5	1.200000 U	0.000000
9*	Standard		Infinity	2.000000		1.200000 U	0.000000
IMA	Standard		Infinity			1.000000 U	0.000000

Stray Light 分析

- 定义LDE数据(C:\ZEMAX\Samples\Short Course\Sc-Stray2)。

Lens Data Editor
 Edit Solves Options Help

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
STO	Standard		Infinity	-23.402100		5.000000	0.000000
2	NonSeqComp		Infinity	-		5.204227	0.000000
3	Standard		Infinity	-0.001000	-	1.000000	U 0.000000
IMA	Standard		Infinity			0.869303	0.000000

Lens Data Editor
 Edit Solves Options Help

Surf:	Type	Exit Loc X	Exit Loc Y	Exit Loc Z	Exit Tilt X	Exit Tilt Y	Exit Tilt Z
OBJ	Standard						
STO	Standard						
2	NonSeqComp	0.000000	0.000000	29.151000	0.000000	0.000000	0.000000
3	Standard						
IMA	Standard						

NSC Editors

- 为望远镜加上外筒以后的杂光分析情况。

Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 2

Edit Solves Errors Detectors Database Help

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position
1 Source Elli..		0	0	0.000000	1.000000	-10.000000
2 Standard Lens		0	0	0.000000	0.000000	4.000000
3 Annulus		0	0	0.000000	0.000000	5.250000
4 Standard Su..		0	0	0.000000	0.000000	25.250000
5 Standard Su..		0	0	0.000000	0.000000	5.750000
6 Standard Lens		0	0	0.000000	0.000000	26.750000
7 Cylinder Pipe		0	0	0.000000	0.000000	0.000000
8 Cylinder Pipe		0	0	0.000000	0.000000	16.000000
9 Cylinder Pipe		0	0	0.000000	0.000000	5.500000
10 Detector Rect		0	0	0.000000	0.000000	29.150000

NSC Editors

Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 2

Edit Solves Errors Detectors Database Help

Object Type	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	# Layout Rays	# Analysis Rays
1 Source Elli..	5.000000	0.000000	0.000000	-	20	100000
2 Standard Lens	0.000000	0.000000	0.000000	K5	-11.559721	0.000000
3 Annulus	0.000000	0.000000	0.000000	ABSORB	1.400000	1.400000
4 Standard Su..	0.000000	0.000000	0.000000	MIRROR	-49.673487	0.000000
5 Standard Su..	0.000000	180.000000	0.000000	MIRROR	15.757889	0.000000
6 Standard Lens	0.000000	0.000000	0.000000	K5	-26.304463	0.000000
7 Cylinder Pipe	0.000000	0.000000	0.000000	MIRROR	6.000000	25.000000
8 Cylinder Pipe	0.000000	0.000000	0.000000	MIRROR	1.200000	10.500000
9 Cylinder Pipe	0.000000	0.000000	0.000000	MIRROR	1.400000	2.500000
10 Detector Rect	0.000000	0.000000	0.000000	ABSORB	0.500000	0.500000

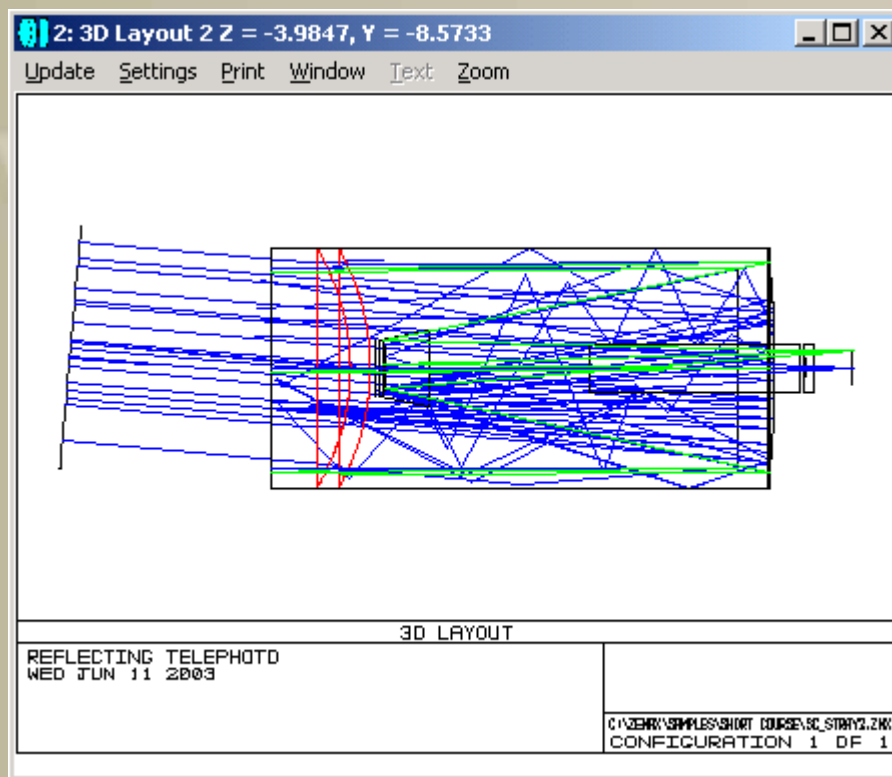
Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 2

Edit Solves Errors Detectors Database Help

Object Type	Power (Watts)	Wavenumber	Color #	X Half Width	Y Half Width	Source Distance
1 Source Elli..	1.000000	0	0	6.100000	6.100000	0.000000
2 Standard Lens	6.000000	6.000000	1.000000	-12.146827	0.000000	6.000000
3 Annulus	0.000000	0.000000				
4 Standard Su..	6.000000	1.200000				
5 Standard Su..	1.400000	0.000000				
6 Standard Lens	1.200000	1.200000	0.400000	0.000000	0.000000	1.200000
7 Cylinder Pipe	6.000000					
8 Cylinder Pipe	1.200000					
9 Cylinder Pipe	1.900000					
10 Detector Rect	50	50	0	0	0	0

3D Layout

- 显示杂光以后的Layout。



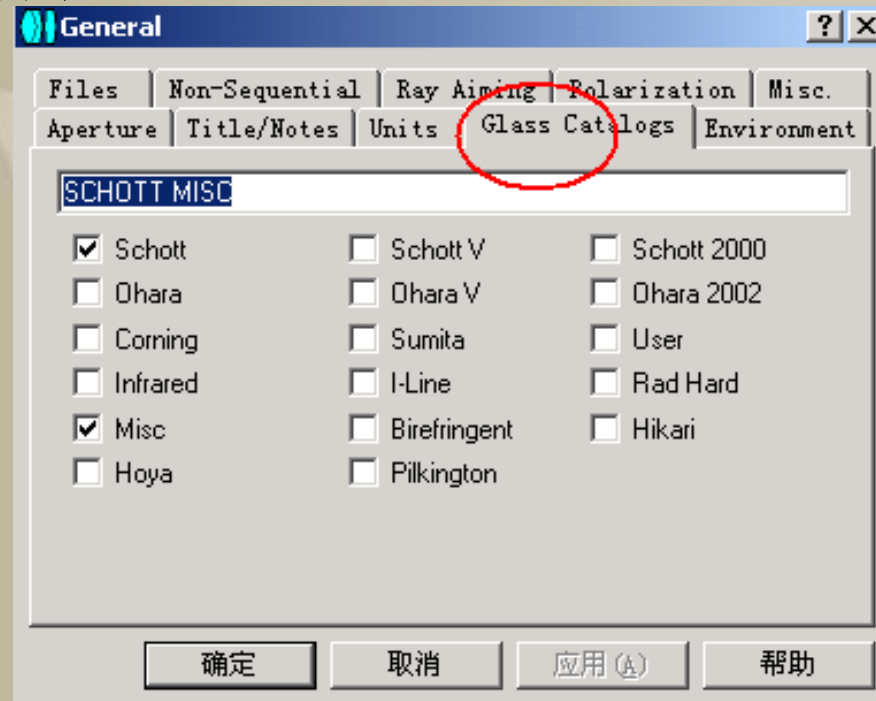
GLASS CATALOGS

Introduction

- ZEMAX自带很多玻璃库。也允许建立自己的玻璃库，对自建玻璃库没有任何限制。
- ZEMAX里面的玻璃折射率数据都是用色散公式和色散系数计算出来的。
- 可以拷贝或移动 glass catalog文件。每个玻璃库有二个文件，扩展名分别为.AGF和.BGF。只需要拷贝或移动.AGF文件。需要的时候，ZEMAX会自动建立BGF文件。

Specifying glass catalogs to use

- 可以在System>>General中选定要用的玻璃库目录。如果没有指定，在设计过程中ZEMAX会自动从玻璃库中去查找，并选定相应的玻璃库目录。



Description of catalog data

可以通过Tools>> GLASS CATALOGS直接调出玻璃数据窗口。

Glass Catalog																			
Catalog:	BIREFRINGENT.AGF	K1:	1.29899000E+000																
Glass:	ADP	L1:	8.92329270E-003																
	ADP-E	D0:	0.0000E+000																
	AGASS3-E	K2:	4.31736400E+001																
	AGASS3	L2:	1.18853100E+003																
Rename:	ADP	D1:	0.0000E+000																
Formula:	Sellmeier 1	K3:	0.00000000E+000																
		L3:	0.00000000E+000																
Index Nd:	1.523454	E0:	0.0000E+000																
Abbe Vd:	52.25678	E1:	0.0000E+000																
<input type="checkbox"/> Ignore Thermal Expansion		Ltk:	0.0000E+000																
<input type="checkbox"/> Exclude Substitution		TCE:	0																
	Min Wave:	0.4	p:	1															
	Max Wave:	1.06	dPgF:	0															
Rel Cost:	?	CR:	?																
		FR:	?																
		SR:	?																
		AR:	?																
		PR:	?																
<table border="0"> <tr> <td>Save Catalog</td> <td>Insert Glass</td> <td>Compute Nd/Vd</td> <td>Sort By Name</td> </tr> <tr> <td>Save Catalog As</td> <td>Cut Glass</td> <td>Make Report</td> <td>Sort By Index</td> </tr> <tr> <td>Reload Catalog</td> <td>Copy Glass</td> <td>Transmission</td> <td>Sort By Abbe</td> </tr> <tr> <td>Exit</td> <td>Paste Glass</td> <td>Fit Index Data</td> <td>Fit Melt Data</td> </tr> </table>				Save Catalog	Insert Glass	Compute Nd/Vd	Sort By Name	Save Catalog As	Cut Glass	Make Report	Sort By Index	Reload Catalog	Copy Glass	Transmission	Sort By Abbe	Exit	Paste Glass	Fit Index Data	Fit Melt Data
Save Catalog	Insert Glass	Compute Nd/Vd	Sort By Name																
Save Catalog As	Cut Glass	Make Report	Sort By Index																
Reload Catalog	Copy Glass	Transmission	Sort By Abbe																
Exit	Paste Glass	Fit Index Data	Fit Melt Data																

glass dispersion formulas

- 有9种色散公式：
 - (1) Schott: 大多厂商在用; >6个参数;
 - (2) the Sellmeier 1: >6个参数;
 - (3) the Sellmeier 2: >6个参数;
 - (4) the Sellmeier 3: >6个参数;
 - (5) the Sellmeier 4: >6个参数;
 - (6) the Herzberger: 红外光谱波段,5个参数;
 - (7) the Conrady: 数据比较少的时候用。只要3个数据;
 - (8) 2个 Handbook of Optics formulas。

Defining Transmission Data

- 选择“Transmission”可以在glass catalog中调出光强透射率数据编辑窗口。ZEMAX用Beer定律表示：

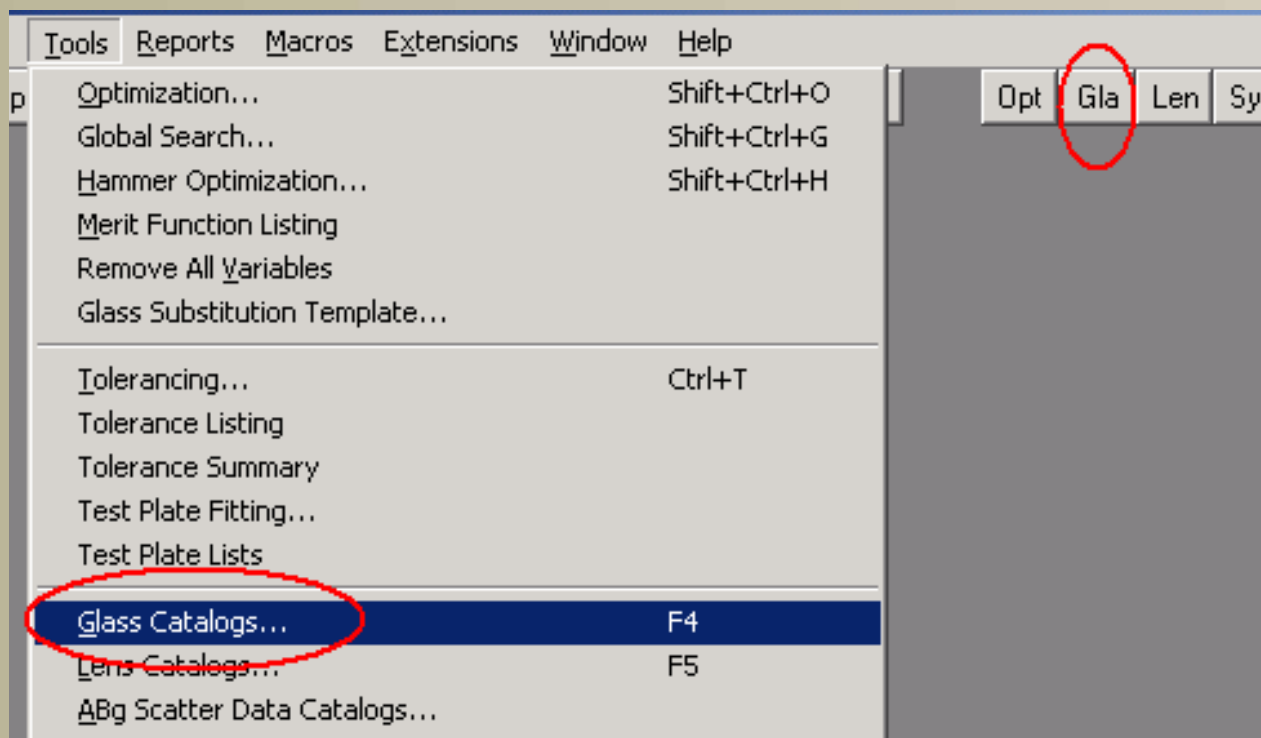
$$t = e^{-\alpha\tau}$$

α 是吸收系数， τ 是在玻璃中的长度。

- 由三个数据组成：波长，光强透过率，参考厚度。
- 不是ZEMAX中提供的玻璃的透过率数据都是有效的，特别是红外材料,和一些非商业玻璃。

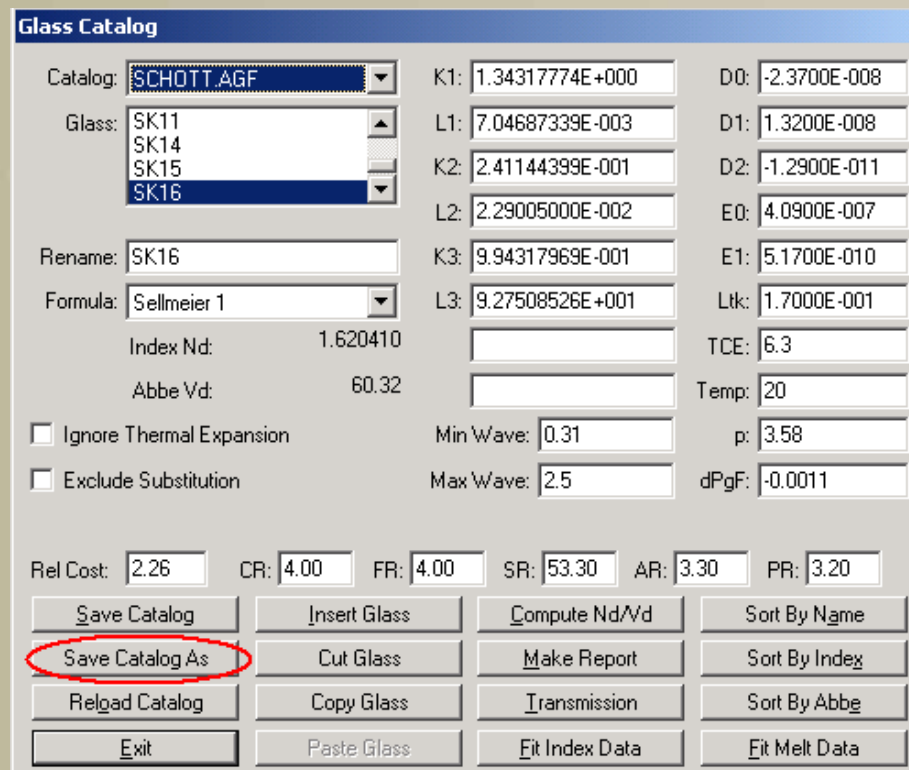
自建玻璃库的方法

(1) 通过Tools>>Catalogs或Gla快捷方式打开Glass catalog。



改名

(2) 在Glass Catalog中任意选定一种已有的玻璃库，用Save Catalog As将它改名为自己的玻璃库的名字（例如myglass）；



Class Catalog

Catalog: SCHOTT AGF

Glass: SK11, SK14, SK15, SK16

Rename: SK16

Formula: Sellmeier 1

Index Nd: 1.620410

Abbe Vd: 60.32

Ignore Thermal Expansion

Exclude Substitution

Min Wave: 0.31

Max Wave: 2.5

K1: 1.34317774E+000

L1: 7.04687339E-003

K2: 2.41144399E-001

L2: 2.29005000E-002

K3: 9.94317969E-001

L3: 9.27508526E+001

D0: -2.3700E-008

D1: 1.3200E-008

D2: -1.2900E-011

E0: 4.0900E-007

E1: 5.1700E-010

Ltk: 1.7000E-001

TCE: 6.3

Temp: 20

p: 3.58

dPgF: -0.0011

Rel Cost: 2.26 CR: 4.00 FR: 4.00 SR: 53.30 AR: 3.30 PR: 3.20

Save Catalog

Insert Glass

Compute Nd/Vd

Sort By Name

Save Catalog As

Cut Glass

Make Report

Sort By Index

Reload Catalog

Copy Glass

Transmission

Sort By Abbe

Exit

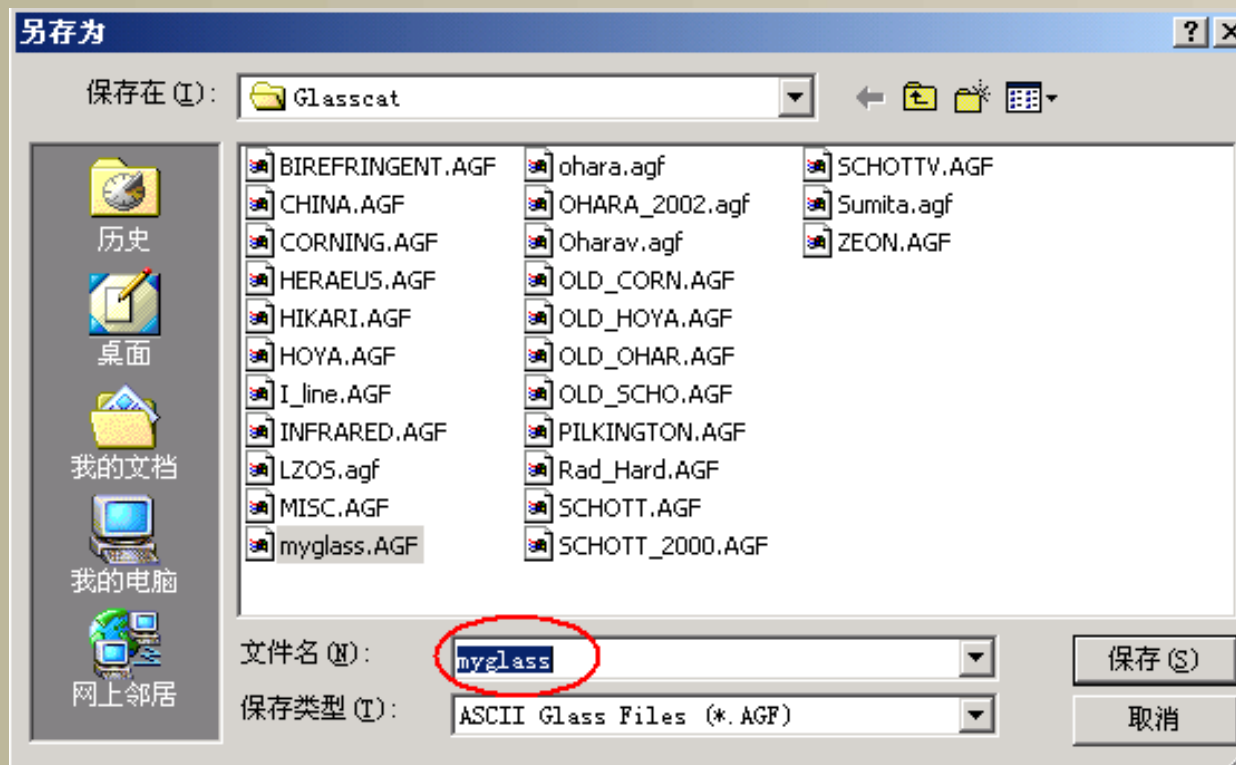
Paste Glass

Fit Index Data

Fit Melt Data

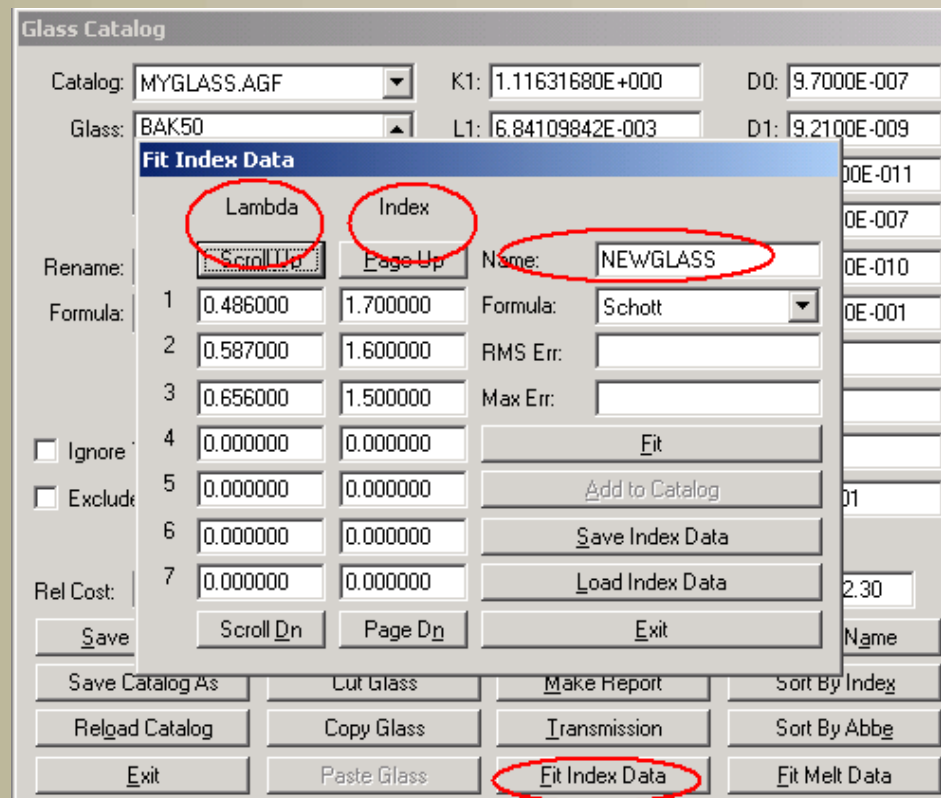
Myglass

用cut glass把myglass玻璃库里面的玻璃删除，但必须保留一个；



Fit Index Data

(3) 点Fit Index Data,调出波长和折射率输入窗口, 输入波长及其所对应的折射率(一般至少六组数据);

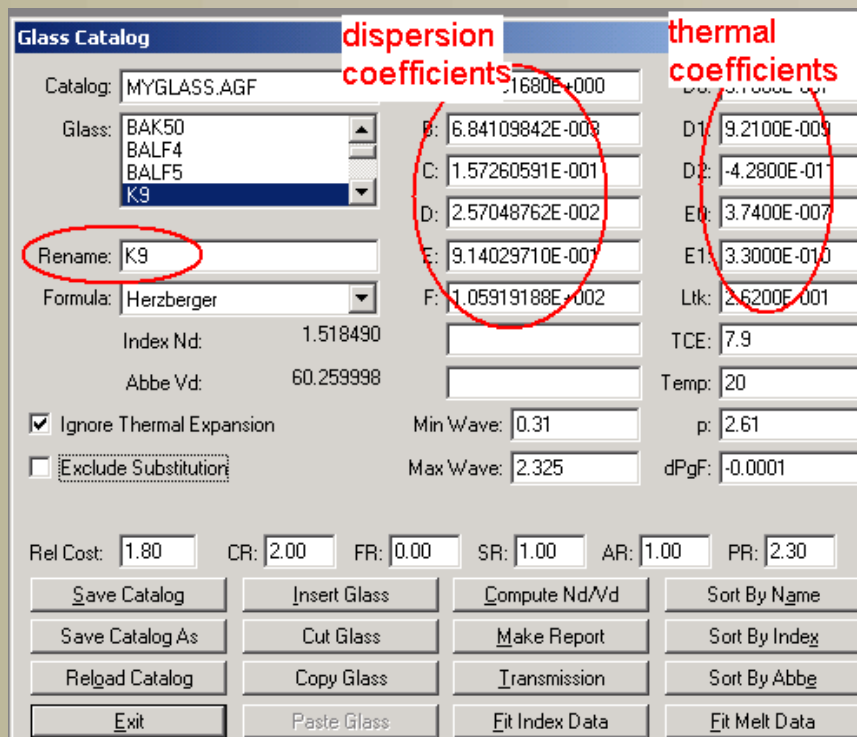


Fit

- (4) 在Name栏输入所添加的玻璃名称，在Formula栏里选定所用的拟合公式，点Fit进行数据拟合计算，并给出拟合误差；
- (5) 点Add to catalog，则所添加的新玻璃就加到myglass玻璃库中。

直接输入色散系数的方法

- 将myglass里的玻璃名称改为自己的（如K9），然后输入色散系数，然后点save catalog就将玻璃加到库里面去了。

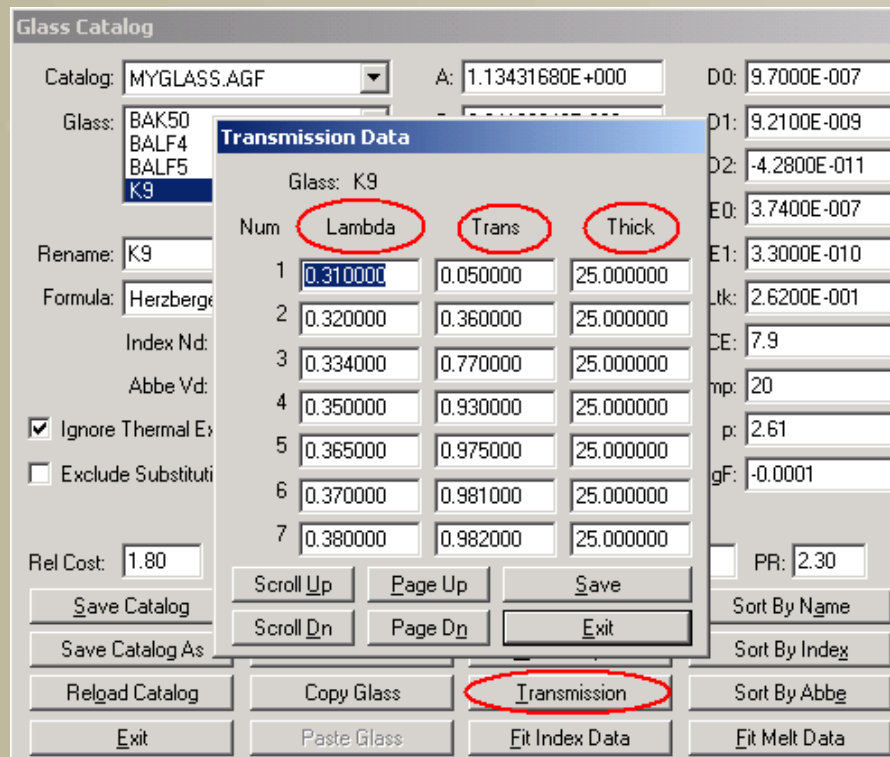


The screenshot shows the 'Glass Catalog' dialog box. The 'Glass' dropdown menu is set to 'K9', and the 'Rename' field also contains 'K9'. The 'Formula' is set to 'Herzberger'. The 'Index Nd' is 1.518490 and 'Abbe Vd' is 60.259998. The 'Ignore Thermal Expansion' checkbox is checked. The 'Min Wave' is 0.31 and 'Max Wave' is 2.325. The 'Rel Cost' is 1.80, 'CR' is 2.00, 'FR' is 0.00, 'SR' is 1.00, 'AR' is 1.00, and 'PR' is 2.30. The 'dispersion coefficients' section (B-F) and 'thermal coefficients' section (D1-E1, Ltk, TCE, Temp, p, dPgF) are highlighted with red circles and labels. The 'Save Catalog' button is visible at the bottom.

Parameter	Value
Catalog	MYGLASS.AGF
Glass	BAK50 BALF4 BALF5 K9
Rename	K9
Formula	Herzberger
Index Nd	1.518490
Abbe Vd	60.259998
Ignore Thermal Expansion	<input checked="" type="checkbox"/>
Exclude Substitution	<input type="checkbox"/>
Min Wave	0.31
Max Wave	2.325
Rel Cost	1.80
CR	2.00
FR	0.00
SR	1.00
AR	1.00
PR	2.30
B	6.84109842E-003
C	1.57260591E-001
D	2.57048762E-002
E	9.14029710E-001
F	1.05919188E-002
D1	9.2100E-003
D2	-4.2800E-01
E0	3.7400E-007
E1	3.3000E-010
Ltk	2.6200E-001
TCE	7.9
Temp	20
p	2.61
dPgF	-0.0001

加入Transmission Data

点Transmission，调出transmission data窗口，输入波长、透过率和厚度，然后保存就可加入玻璃的透过率数据。



The screenshot shows the 'Glass Catalog' software interface. A 'Transmission Data' dialog box is open, allowing the user to input data for a specific glass type (K9). The dialog box contains a table with the following columns: Num, Lambda, Trans, and Thick. The 'Transmission' button at the bottom of the dialog is circled in red. The main window also has several buttons, with the 'Transmission' button at the bottom center circled in red.

Num	Lambda	Trans	Thick
1	0.310000	0.050000	25.000000
2	0.320000	0.360000	25.000000
3	0.334000	0.770000	25.000000
4	0.350000	0.930000	25.000000
5	0.365000	0.975000	25.000000
6	0.370000	0.981000	25.000000
7	0.380000	0.982000	25.000000

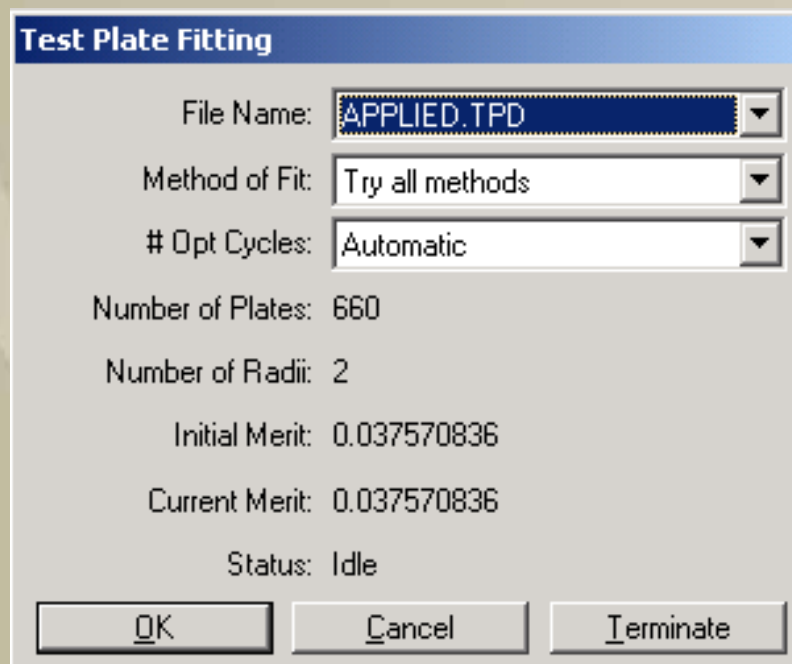
Glass Compare

- 在可见光波长（F-C）范围内，对2个或3个玻璃库中的玻璃，按折射率和色散特性进行比较，找出性能相近的玻璃；
- 可以用于玻璃牌号替换。

Test Plate Fitting

样板比对

- Tools>>test plate fitting

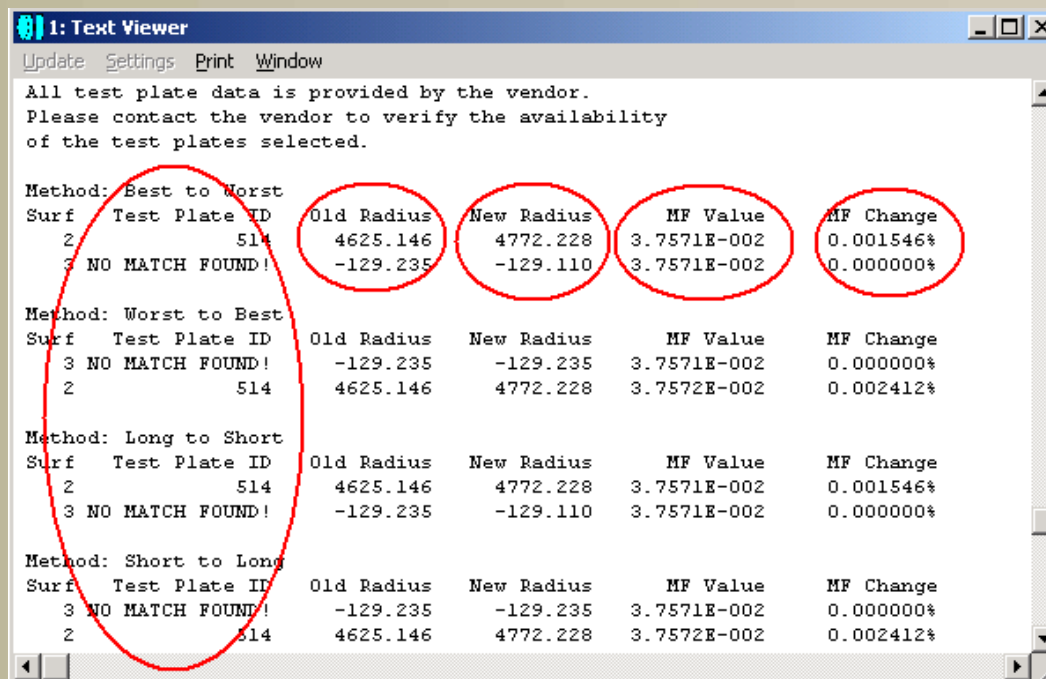


设置

- File name:ZEMAX提供的厂商样板库目录，文件扩展名为.TPD。约有40多种；
- Method of fit:比对的方法。包括：
 - (1) Best to worst
 - (2) Worst to best
 - (3) Long to short
 - (4) Short to long
 - (5) Try all methods.

比对结果例子

- 给出不同方法所得到的结果。包括新、旧曲率半径值，和对MF的影响量。



1: Text Viewer

Update Settings Print Window

All test plate data is provided by the vendor.
Please contact the vendor to verify the availability of the test plates selected.

Method: Best to Worst

Surf	Test Plate ID	Old Radius	New Radius	MF Value	MF Change
2	514	4625.146	4772.228	3.7571E-002	0.001546%
3	NO MATCH FOUND!	-129.235	-129.110	3.7571E-002	0.000000%

Method: Worst to Best

Surf	Test Plate ID	Old Radius	New Radius	MF Value	MF Change
3	NO MATCH FOUND!	-129.235	-129.235	3.7571E-002	0.000000%
2	514	4625.146	4772.228	3.7572E-002	0.002412%

Method: Long to Short

Surf	Test Plate ID	Old Radius	New Radius	MF Value	MF Change
2	514	4625.146	4772.228	3.7571E-002	0.001546%
3	NO MATCH FOUND!	-129.235	-129.110	3.7571E-002	0.000000%

Method: Short to Long

Surf	Test Plate ID	Old Radius	New Radius	MF Value	MF Change
3	NO MATCH FOUND!	-129.235	-129.235	3.7571E-002	0.000000%
2	514	4625.146	4772.228	3.7572E-002	0.002412%

自建样板库

- (1)用文本编辑软件，按规定的格式编辑好一个样板数据库，并生成TPD格式的文件，
- (2)参照其格式输入自己的样板库，编辑好，保存在指定的目录下面即可。

Gaussian Beam Analysis

Gaussian beams

- Gaussian激光光束由beam waist size, a wavelength和物空间中的位置（发散角）描述。是一种理想的光束，只能近似模拟。
- 实际激光束可以用理想的“embedded” Gaussian光束和品质因子M2（定义相对embedded Gaussian mode 的光束大小和发散角）模拟。理想的M2的值是1，但实际激光， $M2 > 1$ 。
- embedded beam由光腰相对surface 1的位置（不是物面）和束腰的径向大小定义。
- embedded beam通过透镜系统传播，ZEMAX计算和显示在每个面上X, Y方向的光束数据。

Gaussian Beam are paraxial

- Gaussian beams是理想的、完善的。
- Gaussian 光束参数的计算是基于近轴光线数据的，不适合于大像差系统，和不能用近轴光学描述的非旋转对称系统。
- 忽略所有apertures,即忽略孔径的衍射作用，假定Gaussian光束在系统中所有透镜的孔径中很好传播。
- 如果光束不是简单的Gaussian光束，用POP更好。

Gaussian Beam propagation

- ZEMAX可以模拟三种光束的传播：
 - (1) Gaussian beam
 - (2) Skew Gaussian beam
 - (3) Fully POP。
- Gaussian beam计算：
 - (1) 对TEM00模有用
 - (2) 光学系统没像差，没有aperture（没有衍射）
 - (3) 当不是TEM00模，大像差和有aperture时，用POP。

Default beam parameters

- ZEMAX缺省的光腰为0.05 lens units (不论是什么单位), 到 surface 1的距离为0 (即腰在第一个面上)。
- 可以输入任意其它的光腰大小和位置的Gaussian光束。

Propagating the embedded beam

- 一旦建立了初始的光束参数，则ZEMAX通过光学系统追迹 embedded beam，计算系统中每个面上的radial beam size, narrowest radial waist, 相对于光腰的surface coordinate, 光束的位相曲率半径, semi divergence angle, Rayleigh range等参数。

quality factor

- 对有像差的、mixed-mode beams,在基本的Gaussian光束上加一个品质因子M2模拟,它总是大于1。
- M2 factor决定实际Gaussian光束的大小和像差。M2 factor需要实验直接测量。如果M2 factor设置为缺省值1,则ZEMAX计算TEM00 模的数据。如果 $M2 > 1$,则ZEMAX计算embedded Gaussian beam参数和实际光束的参数。

Example: 耦合镜头设计

—He-Ne激光束的特性如下，在output port进行测量结果为：

- 波长：0.6328microns
- 光束直径：2.5mm
- 发散角：0.175mrad
- 在激光束后面10mm处有一个厚度为5mm的BK7透镜，像面到透镜的距离为100mm。
- 问题：设计这个镜头，使像面上的Gaussian spot size最小。

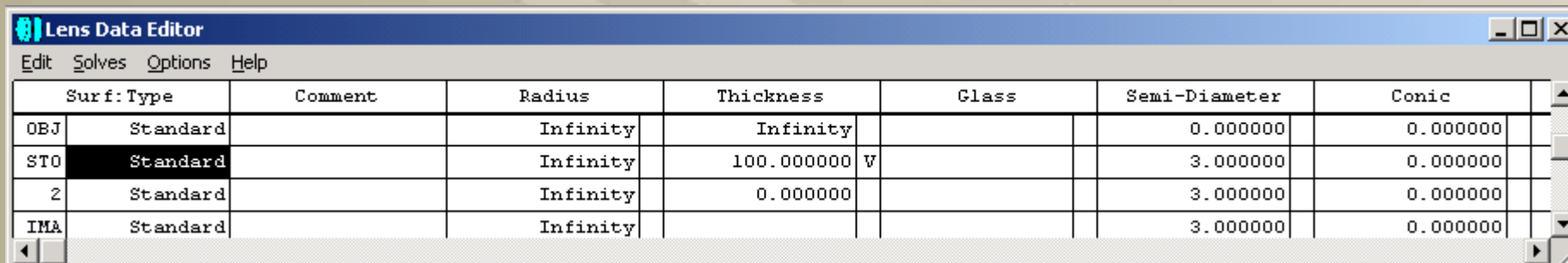
Note

- 激光的output port不是beam waist，它通常在output face后面很远的距离的地方。
- ZEMAX中，Gaussian光束的计算中，光腰的位置是相对于surface 1定义的。

Step 1: 定义激光束

- 高斯光束不追迹!
- 将EPD设置为6mm, 这样可以看到透镜, 波长设置为0.633,
- 光腰的位置是相对surface 1的: 这里将光腰放在surface 1上, surface 2为激光束的output face。
- 将初始的surface 1的厚度设置为100mm。则光腰的大小为:

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan \theta} = \frac{0.633 \times 10^{-3}}{3.14 \times \tan 0.175} \approx 1.15 \text{mm}$$



Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
ST0	Standard		Infinity	100.000000	V	3.000000	0.000000
2	Standard		Infinity	0.000000		3.000000	0.000000
IMA	Standard		Infinity			3.000000	0.000000

Step2: Interactive analysis

- 光腰=1.15mm，surface 2为光束的output face。然后用update更新，可以得到近轴高斯光束的设置结果。OK后，可以查看surface 2上的发散角是否为0.175mrad。

Paraxial Gaussian Beam Settings

Wavelength: 1 M2 Factor: 1

Waist Size: 1.15 Surf 1 to Waist: 0

----- Interactive Analysis -----

Orient: Y-Z Surface: 2

Size	1.15013E+000	Radius	4.30908E+005
Waist	1.15000E+000	Rayleigh	6.56360E+003
Z	1.00000E+002	Divergence	1.75209E-004
Wavelength	6.33000E-001	M2 Factor	1.00000E+000

Step3: 对光腰进行优化

- Surface 1是光腰，其半径为1.15mm（将发散角设置为0.175mrad），
- Surface 2是激光束的output，半径为1.25mm。
- 那么要满足设计要求，surface 1的thickness应该为多少？步聚为：
 - （1）将surface 1的thickness设为变量，
 - （2）用GBPS（高斯光束近轴大小）优化，使surface 2上的Gaussian 束腰为1.25mm。

Merit Function Editor: 2.160427E-010

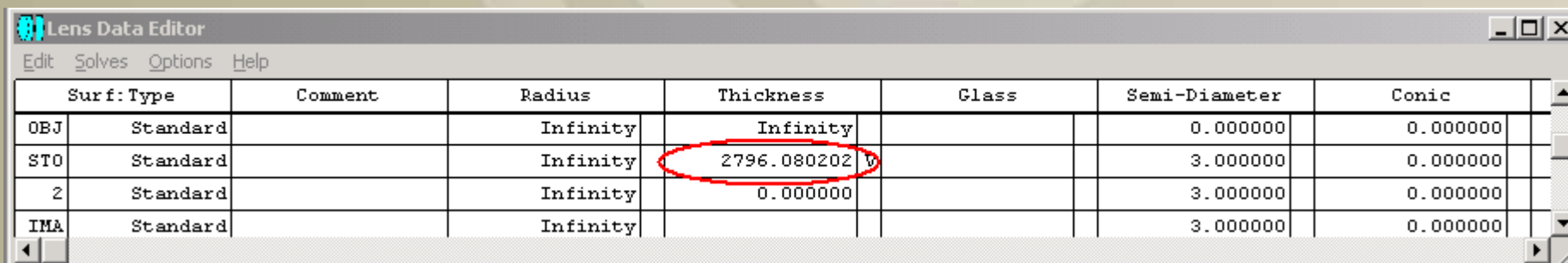
Edit Tools Help

Oper #	Type	Surf	Wave	UseX	W0	S1toW	Target	Weight
1 (GBPS)	GBPS	2	1	0	1.150000	0.000000	1.250000	1.0

优化结果

- 通过优化，surface 1(光腰)到surface 2的距离接近2.8m，现在surface 2就是激光的output face。

注：可以在GBPS操作数中将S1_to_w为设置为一2796mm使surface 1成为output face



Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
ST0	Standard		Infinity	2796.080202		3.000000	0.000000
2	Standard		Infinity	0.000000		3.000000	0.000000
IMA	Standard		Infinity			3.000000	0.000000

Step4: 加入透镜

- 在surface 2后面10mm处加一个厚度为5mm的透镜，它到像面的距离为100mm

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
ST0	Standard		Infinity	2796.080202	V	3.000000	0.000000
2	Standard		Infinity	10.000000		3.000000	0.000000
3	Standard		Infinity	5.000000	BK7	3.000000	0.000000
4	Standard		Infinity	100.000000		3.000000	0.000000
IMA	Standard		Infinity			3.000000	0.000000

Step5:Optimize!

- 将surface 1的thickness上的V移去，
- 将lens的前后半径设置为变量，
- 在MF中，将GBPS在surface 5上的目标设置为0。
- 优化。
- 结果如下：

Surf: Type		Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
ST0	Standard		Infinity	2796.080202		3.000000	0.000000
2	Standard		Infinity	10.000000		3.000000	0.000000
3	Standard		128.915750 V	5.000000	BK7	3.000000	0.000000
4	Standard		-85.737649 V	100.000000		2.961115	0.000000
IMA	Standard		Infinity			0.021966	0.000000

优化后像面上的结果

- 可以看到，像面（5）上高斯光束直径约为32micron。

Paraxial Gaussian Beam Settings

Wavelength: 1 M2 Factor: 1

Waist Size: 1.15 Surf 1 to Waist: 0

---- Interactive Analysis ----

Orient: Y-Z Surface: 5

Size	1.63226E-002	Radius	1.03426E+002
Waist	1.63213E-002	Rayleigh	1.32207E+000
Z	1.69024E-002	Divergence	1.23446E-002
Wavelength	6.33000E-001	M2 Factor	1.00000E+000

Note

- Gaussian光束的计算只限于计算高斯参数;
- 不能讨论高斯光束的MTF, PSF等;
- POP可以进行更详细的分析。

Skew Gaussian Beams

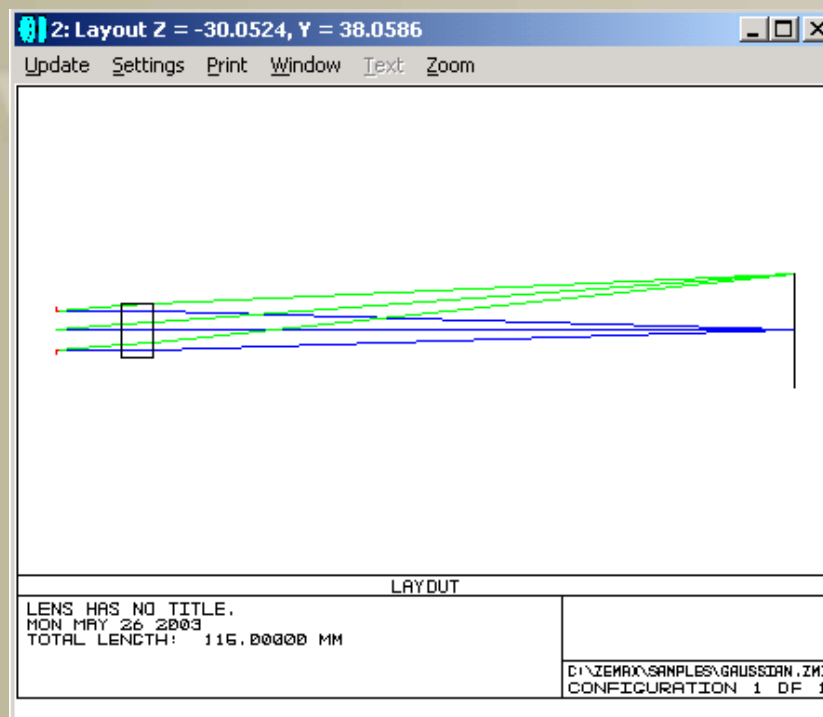
- **Skew Gaussian Beams**可以输入到光学系统中任何面的任何视场角上，可以离轴地在光学系统中传播。
- **Skew Gaussian Beams**的参数计算是用实际光束，考虑像散，但不考虑高级像差。
- 计算**ideal skew Gaussian beam**数据，如**beam size**, **beam divergence**, 和**waist locations**。光束在对称光学系统中不一定要在光轴上，可以是任何角度。

Skew Gaussian Beams 的定义

- Skew Gaussian Beams 的定义由starting surface前 X, Y方向的束腰大小定义。（Analysis>>POP>>Skew Gaussian beam）
- Field和wavelength用来定义通过光学系统追迹的主光线。chief ray是skew Gaussian beam的光轴。
- 如果系统中包括有non-sequential组件，Skew Gaussian Beam结果一般不精确。

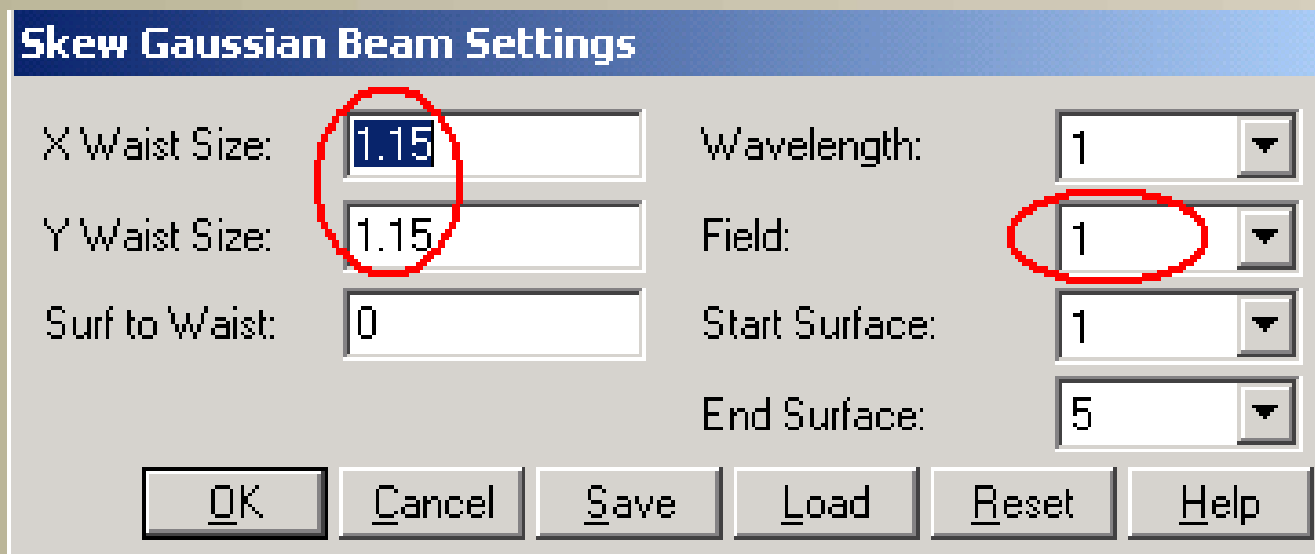
Example

- 在前面的例子中，将surface 2(output port)设置为stop，
- 在y视场中增加一个+5度视场点。2D layout如下：



Skew Gaussian Beam Analysis

- 打开Gaussian beam分析窗口，输入start surface(surface 1)上的X，Y方向光腰的大小1.15mm，
- 先用field 1确认一下轴上光线计算的结果。



The image shows a software dialog box titled "Skew Gaussian Beam Settings". It contains several input fields and buttons. The "X Waist Size" and "Y Waist Size" fields are both set to "1.15" and are circled in red. The "Field" dropdown menu is also set to "1" and is circled in red. Other fields include "Wavelength" (1), "Surf to Waist" (0), "Start Surface" (1), and "End Surface" (5). At the bottom, there are buttons for "OK", "Cancel", "Save", "Load", "Reset", and "Help".

Parameter	Value
X Waist Size	1.15
Y Waist Size	1.15
Surf to Waist	0
Wavelength	1
Field	1
Start Surface	1
End Surface	5

Skew Gaussian Beam Analysis

- 然后将field设置为2，看5度视场的分析结果。
- 在像面上，光束Y方向的大小为20.5micron，X方向为17.5micron。
- 也可以进行优化。

Start Surf to waist distance: 0.00000E+000

Y-Direction Fundamental Mode Results:

Surf	Size	Waist	Position	Radius	Divergence	Rayleigh
1	1.15439E+000	1.15000E+000	4.30845E-003	9.99914E+009	1.75209E-004	6.56360E+003
STO	1.25551E+000	1.15000E+000	2.80677E+003	1.81557E+004	1.75209E-004	6.56360E+003
3	1.25698E+000	4.04572E-002	-3.81457E+002	-3.81854E+002	3.28716E-003	1.23076E+001
4	1.23923E+000	1.61786E-002	-9.92954E+001	-9.93124E+001	1.24535E-002	1.29905E+000
IMA	2.05386E-002	1.61786E-002	1.00802E+000	2.68213E+000	1.24535E-002	1.29905E+000

X-Direction Fundamental Mode Results:

Surf	Size	Waist	Position	Radius	Divergence	Rayleigh
1	1.15000E+000	1.15000E+000	4.30808E-003	Infinity	1.75209E-004	6.56360E+003
STO	1.25073E+000	1.15000E+000	2.80677E+003	1.81557E+004	1.75209E-004	6.56360E+003
3	1.25143E+000	4.07197E-002	-3.82969E+002	-3.83374E+002	3.26596E-003	1.24679E+001
4	1.23512E+000	1.62799E-002	-9.97858E+001	-9.98031E+001	1.23760E-002	1.31538E+000
IMA	1.74949E-002	1.62799E-002	5.17584E-001	3.86047E+000	1.23760E-002	1.31538E+000

ZEBASE介绍

ZEBASE介绍

- ZEBASE是一个有600多个ZEMAX格式的光学设计镜头集，
- ZEBASE 包括一本 Milton Laikin的书 << *Lens Design, Third Edition (474 pages)* >> ZEBASE里面有些设计就是这本书上的。
- 厚达360 页的ZEBASE User's Guide ， 按种类和 F/#列出来，以便于搜索。 用户指南中显示 Layout, Ray Fan Plot, 和 Field Curvature 及 Distortion Plots,还有其它有用的数据，如 EFL, F/#, 和Field of View 。

ZEBASE中包含的镜头类型

- ZEBASE包括：singlets, doublets, achromats, triplets, eyepieces, magnifiers, afocal systems, beam expanders, air spaced triplets, inverse telephotos, retrofocus, wide angles, telephotos, Petzval lenses, microscope objectives, double Gauss lenses, endoscopes, periscopes, riflescopes, mirror telescopes, scanning lenses, projection lenses, zoom lenses, and more.

LensView介绍

什么是LensVIEW?

LensVIEW是一个全面的镜头设计**CD-ROM**数据库，包括美国和日本专利文献和著名的 **Zeiss** 照相镜头。

里面包含**1800**年到最近的光学设计数据，有**30,000**多个独立的设计，对每个版本，会增加更多的数据。

强大的搜索功能

- 有 **64**种不同的光学和目录参数。还有一个特殊的**LensVIEW** 分类系统，有**110**个不同的类别，使搜索更容易。

搜索参数

- Effective Focal Length (EFL)
- Max. Field Angle
- Stop Surface Number
- Priority Data Number of Examples
- Afocal EFL
- Max. Real Image Height
- Surface Type
- International Classification
- Number of Inventors
- Back Focal Length
- Max. Object Height
- Zoom Surface

搜索参数

- **Original U.S. Classification**
- **First Inventor's First Name**
- **Working Distance**
- **Wavelength (Primary)**
- **No. of Zoom Positions**
- **Current U.S. Classification**
- **First Inventor's Last Name**
- **Telephoto Ratio**
- **Refractive Index (Primary)**
- **Fraction of Patent Scale**
- **Field of Search**
- **First Inventor's Address**
- **Overall Physical Length**

搜索参数

- Abbe Number
- Patent Number
- U.S. Patents Cited
- Any Inventor's First Name
- Entrance Pupil Diameter
- Nf-Nc
- Title
- Foreign Patents Cited
- Any Inventor's Last Name
- EPD Distance
- No. of Glass Elements
- Abstract
- Other Publications Cited

搜索参数

- Any Inventor's Address
- Max. Paraxial Image Height
- Overall Glass Length
- Assignee
- Primary Examiner
- Related Application Data
- Lateral Magnification
- No. of Optical Surfaces
- Assignee Address
- Assistant Examiner
- User-Entered Keywords
- Angular Magnification
- No. of Physical Surfaces
- Application Number Attorney

搜索参数

- User-Entered Comments
- Zoom Ratio
- No. of Cemented Surfaces
- Filing Date
- Number of Claims
- LensVIEW Classification
- Numerical Aperture
- No. of Groups
- Issue Date Number of Figures

可以转换你想要的文件类型

- **LensVIEW** 中的所有文件都可以转换成所要的文件类型，包括：**ACCOS V™**, **CODE V®**, **OSLO®**, **SIGMA®** 和 **ZEMAX®**。
- 可以给出直观的图形界面。支持多个图形窗口，包括 **cross-sectional layouts**, **aberration plots**, 和很多对话框和文本显示窗口。

LensView例子

LensVIEW - INT
_ □ ×

File Edit Search Navigate View Window Help

BIBLIOGRAPHIC DATA

Patent #: 4,756,608
Title: HIGH ZOOM-RATIO FINITE-DISTANCE ZOOM LENS

Inventor: Takayuki Itoh
Address: Tokyo, Japan

Assignee: Asahi Kogaku Kogyo Kabush
Address: Tokyo, Japan

Attorney: Sughrue, Mion, Zinn, MacPea

Primary Examiner: John K. Corbin
Asst. Examiner: Rebecca D. Gass

LensVIEW CLASSIFICATION

3 Classifications: **LensVIEW Clas**

- I. REFRACTING OBJECTIVES
- I.16. ZOOM LENSES
- I.16.E. 4 ZOOMING GROUPS
- I. REFRACTING OBJECTIVES
- I.16. ZOOM LENSES
- I.16.H. FIXED CONJUGATE DISTA
- I. REFRACTING OBJECTIVES
- I.16. ZOOM LENSES
- I.16.H. FIXED CONJUGATE DISTA

OPTICAL PRESCRIPTION

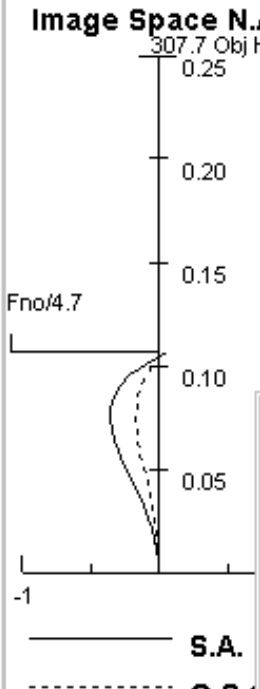
	Radius	Thick
OBJ:	INFINITY	112
S1:	440.407362	9.6
S2:	175.327002	5.3
S3:	184.746378	31.
S4:	-1992.2462	0.6
S5:	212.916086	7.8
S6:	134.150667	22.
S7:	394.866421	0.5
S8:	125.379350	21.
S9:	537.570247	6.3
S10:	-4434.4113	4.1
S11:	41.361118	3.6
S12:	86.896948	3.9
S13:	57.268609	6.1

SPECIAL SURF/MATE

None

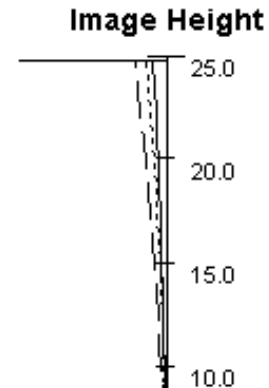
OPTICAL ABERRATIONS

Image Space N.A.



Fno/4.7

Image Height

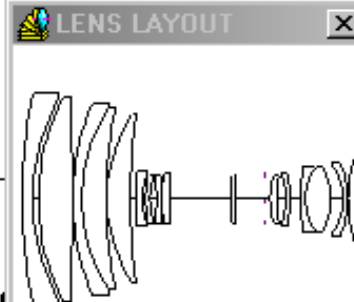


S.A. _____

O.S. _____

Auto/Auto Scale Auto Scale 5 mm

LENS LAYOUT



GROUP NAVIGATION
_ □ ×

View all:

 PATENTS
 EXAMPLES
 ZOOMS

U.S. Patent: 4,756,608

56th Lens of 59 in Grouping

Example: 1

of: 3

Zoom: 1

of: 2

EFL = 100.000 N.A. = 0.1064

EPD = 22.997 IMag = -0.0806

F/# = 4.35 fAng = 13.4607

谢谢大家！