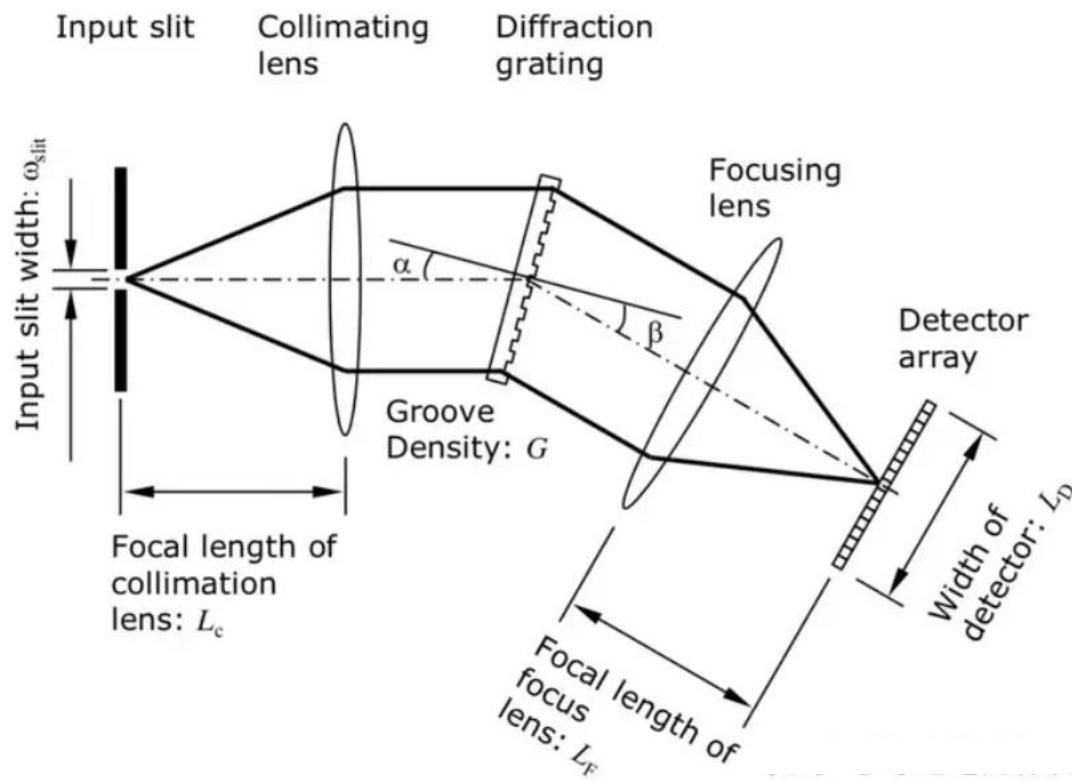


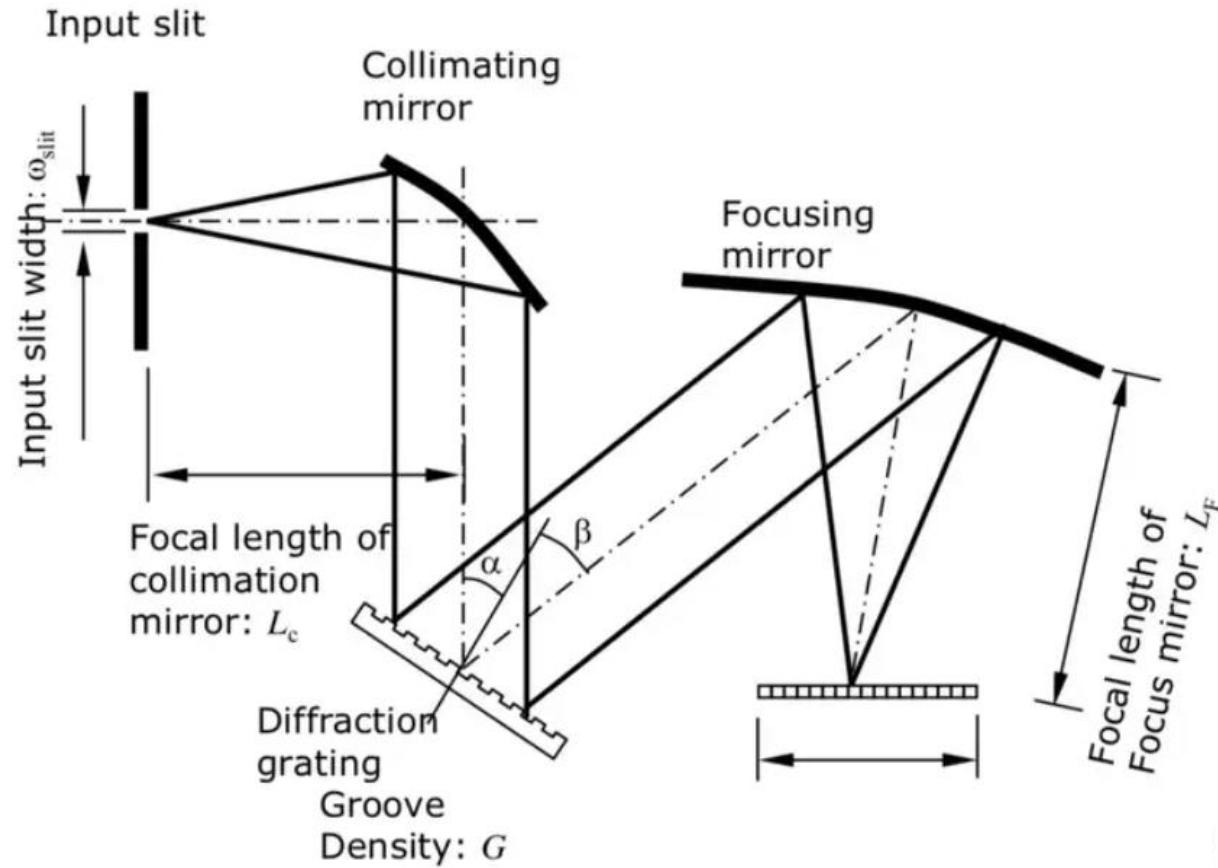
橡树小姐的 光学设计小课堂

——光谱仪

光谱仪的基本结构

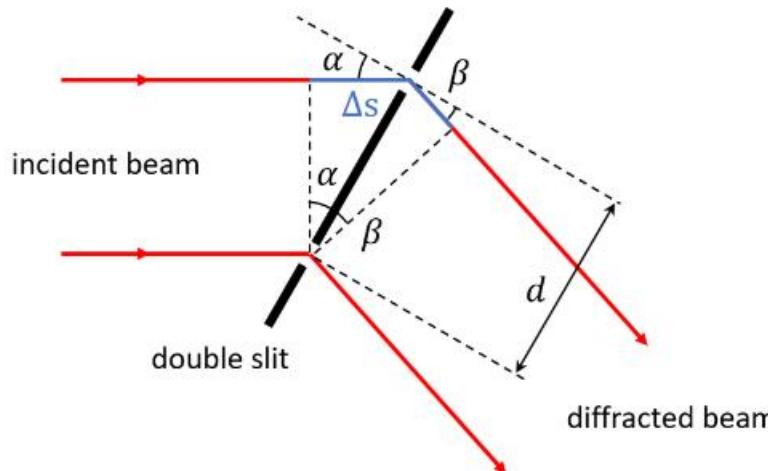
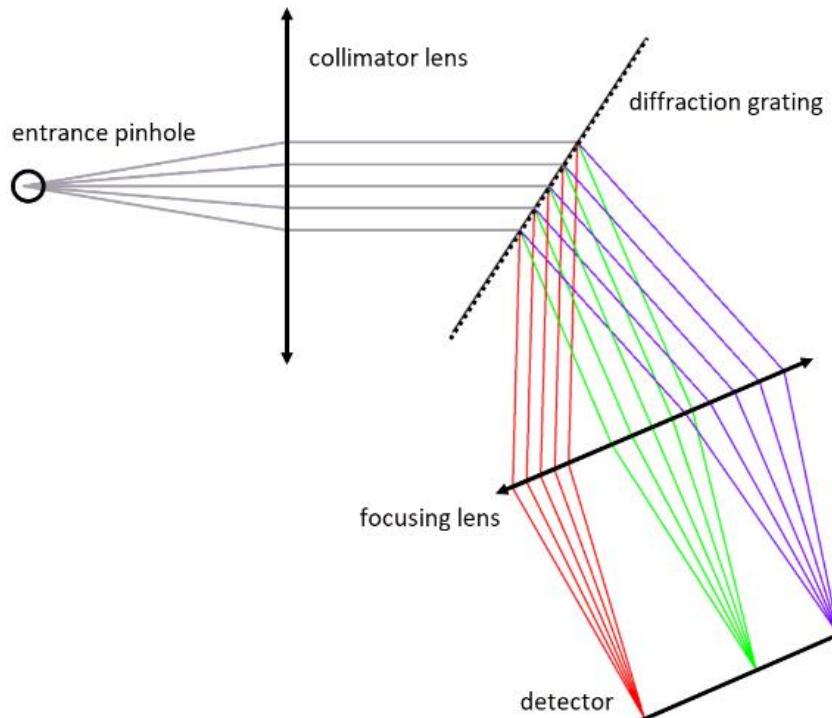


透镜—光栅—透镜(LGL)光谱仪模型



CT结构光栅光谱仪模型

光栅光谱仪的理论模型和参数计算



$$\Delta s = d(\sin \alpha + \sin \beta)$$

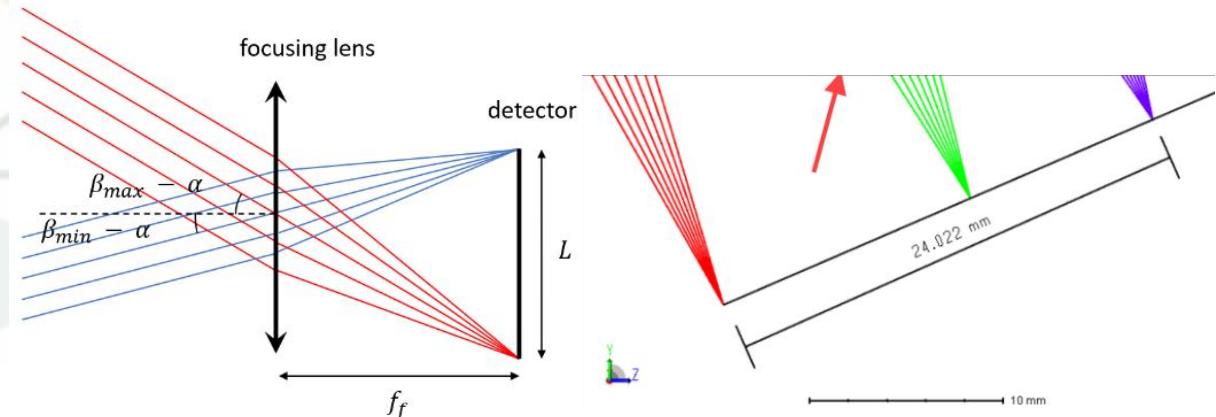
$$\Delta s = \lambda$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{d} - \sin \alpha \right)$$

zemax衍射光栅的应用

$$n_2 \sin \theta_2 - n_1 \sin \theta_1 = \frac{M\lambda}{d} = M\lambda T$$

θ_2 为折射角, θ_1 为入射角,
 n_1 和 n_2 为光栅前后折射率, M
为衍射级次, d 为有效光栅间
隔, T 为每微米有效光栅刻线,
+、-号分别表示入射角和衍射
角在法线的同侧或异侧



波长范围和光栅常数确定后，便可确定衍射角范围

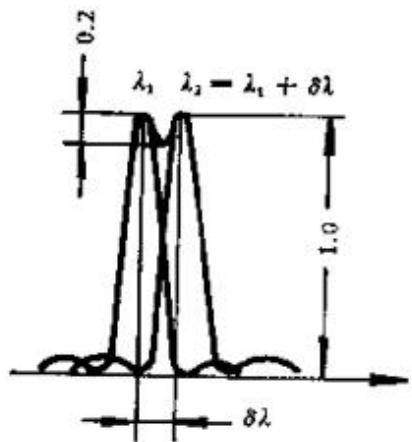
$$L = f_f (\tan(\beta_{max} - \alpha) + \tan(\beta_{min} - \alpha))$$

根据衍射角范围和聚焦透镜焦距便可计算出探测器宽度

光谱仪的分辨率

光谱分辨率 (R) 是指在光谱中分辨细节特征的能力，其定义为 $R = \lambda / \Delta\lambda$ ，其中 $\Delta\lambda$ 在波长为 λ 时能够区分开的波长差的最小值。

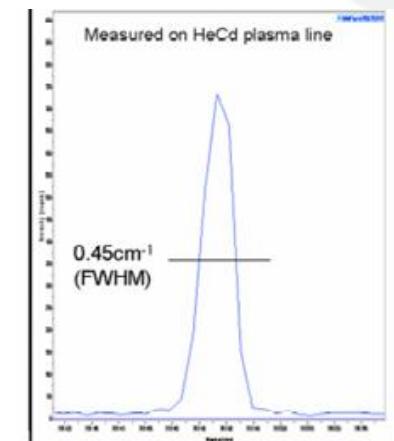
能够区分开的标准遵循瑞利准则，当两条强度分布轮廓相同的谱线底最大值和最小值重合时，能够被分辨



瑞利准则两个前提：

- 假设两个谱线通过光谱仪器后，强度分布轮廓完全相同；
- 假设接收系统的灵敏度大于等于20%。（人眼的灵敏度为10%~20%）

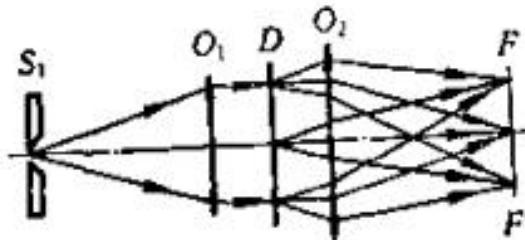
另一种说法：光谱分辨率是指探测器在波长方向上的记录宽度，又称波段宽度 (band width)。光谱分辨率被严格定义为仪器达到光谱响应最大值的50%时的波长宽度 (FMHW)。本质也是瑞利准则，尤其适用于高光谱成像。



光栅光谱仪的分辨率

- 首先，要想实现最高的光谱分辨率，相邻的两个波长一定是落在探测器相邻的两个像素上。
- 其次，光学系统的成像能力要能够清晰分辨该大小的像素，所以光学系统的点列图RMS半径要小于像素大小，或者MTF在该像素大小的截止频率下大于0.3甚至0.5

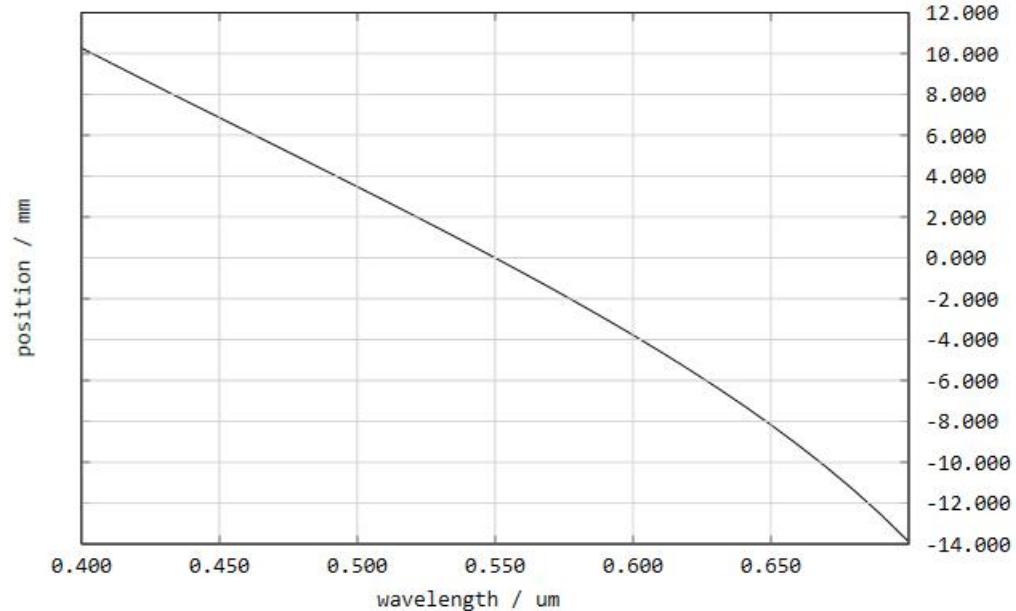
提高分辨率的方法：



- 光谱仪可以看作是将物体（入射针孔，即点光源）映射到像面（探测器）的光学系统。
所以狭缝越窄，分辨率越高，但是狭缝变窄光强就会降低，并且有衍射极限的影响；
- 各波长的光在探测器上分的越开，分辨率越高，所以**光栅刻线越密，分辨率越高**，但会受到衍射极限的影响；
- 各波长的光在探测器上分的越开，分辨率越高，所以**聚焦透镜的焦距越长分辨率越高**，但是会引起体积增大；
- **探测器像素越小，所能实现分辨率越高**，但是探测器像素大小受衍射极限的影响，小于艾里斑半径是没有用的。
- 所以要综合考虑狭缝尺寸、光栅刻线、聚焦透镜焦距、探测器宽度以及像素大小等

光栅光谱仪的分辨率

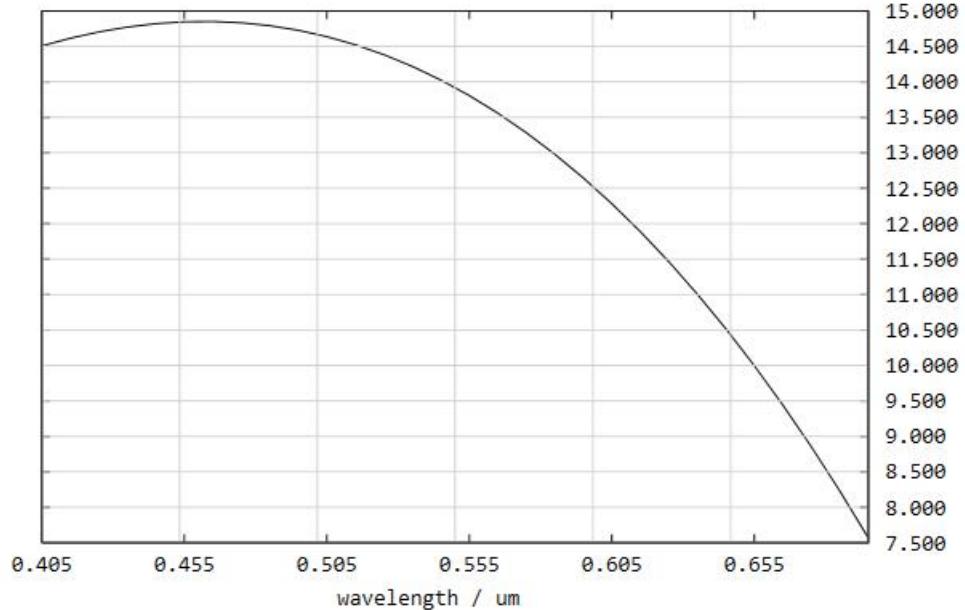
Mapping Function



$$L = f(\lambda)$$

通过扫描光谱仪带宽的波长并记录光线在探测器上的位置，来计算映射函数，得到光线在探测器上的位置和波长的关系

Spectral Resolution



光谱仪的光谱分辨率R，即部分带宽 $\delta\lambda$ 与每单位宽度探测器 ΔL 的比值：

$$R = \frac{\delta\lambda}{\Delta L}$$

光谱分辨率与探测器的像素宽度相乘，最终得到光谱仪的分辨率（前提是该系统能够清晰分辨该像素大小）

更直观分方法是设置两个相邻的波长，观察点列图（或者点扩散函数），可以清晰分辨的最小波长间隔即为光谱分辨率

计算光谱分辨率的ZPL

```
! Calculate Mapping Function and Resolution  
! Lorenz Martin, 4 Feb 2020
```

```
! Get number of system wavelengths  
num_wav = SYPR(201)
```

```
! Define wavelength range  
min_wav = WAVL(1)  
max_wav = WAVL(num_wav)  
delta_wav = 0.01  
num_wav_steps = INTE((max_wav - min_wav)/delta_wav) + 1
```

```
! Define variables  
DECLARE wavelengths, double, 1, num_wav_steps + 1  
DECLARE y_positions, double, 1, num_wav_steps + 1  
DECLARE wavelengths_for_d, double, 1, num_wav_steps  
DECLARE d_wavelengths, double, 1, num_wav_steps  
DECLARE d_y_positions, double, 1, num_wav_steps  
DECLARE resolution, double, 1, num_wav_steps
```

```
! Set MC operand to change Wavelength 1  
SETMCOPERAND 1, 0, "WAVE", 0
```

```
! Loop to go through wavelength range and find position of beam on detector with respect to central wavelength
```

```
FOR i, 0, num_wav_steps, 1  
    wavelength = min_wav + i*delta_wav  
    SETMCOPERAND 1, 1, wavelength, 0  
    SETCONFIG 1  
    RAYTRACE 0, 0, 0, 0, 1  
    yf = RAYY(9)  
    wavelengths(i+1) = wavelength  
    y_positions(i+1) = yf  
    IF (i>0)  
        wavelengths_for_d(i) = wavelengths(i) + delta_wav/2  
        d_wavelengths(i) = wavelength - wavelengths(i)  
        d_y_positions(i) = yf - y_positions(i)  
        resolution(i) = -d_wavelengths(i)/d_y_positions(i)*1000  
    FNDOF
```

```
! Uncomment next line to display numerical values  
! PRINT "Wavelength / nm: ", wavelength*1000, " Fy: ", , " ", yf
```

```
NEXT
```

```
! Reset system wavelength to initial value  
SETMCOPERAND 1, 1, min_wav, 0  
SETCONFIG 1
```

定义波长范围和采集步长

定义数值矩阵大小

采用多重结构遍历波长，并记录该波长在探测器的位置

计算分辨率, $d\lambda/dL$

多重结构改回初始值

```
! Plot mapping function  
PLOT NEW  
PLOT TITLE, "Mapping Function"  
PLOT TITLEX, "wavelength / um"  
PLOT TITLEY, "position / mm"  
PLOT BANNER, "Position of wavelength on detector, relative to position of primary wavelength"  
PLOT RANGEX, wavelengths(1), wavelengths(num_wav_steps+1)  
PLOT TICK, 0.05, 0  
PLOT DATA, wavelengths, y_positions, num_wav_steps + 1, 0, 0, 0  
PLOT GO
```

```
! Plot resolution  
PLOT NEW  
PLOT TITLE, "Spectral Resolution"  
PLOT TITLEX, "wavelength / um"  
PLOT TITLEY, "resolution / pm/um"  
PLOT BANNER, "Fraction of bandwidth per detector width"  
PLOT RANGEX, wavelengths_for_d(1), wavelengths_for_d(num_wav_steps)  
PLOT TICK, 0.05, 0  
PLOT DATA, wavelengths_for_d, resolution, num_wav_steps, 0, 0, 0  
PLOT GO
```

画图

透射式光谱仪优化设计

应用场景	OCT
波长范围	855 nm 到 905 nm
光栅刻线	1800 l/mm
像素大小	10 μm
探测器长度	20mm
聚焦透镜焦距	125mm

光源设置

孔径类型: 物方空间NA

孔径值: 0.12

切趾类型: 高斯

切趾因子: 1.0

净口径余量 毫米: 0.0

净口径余量 %: 0.0

相关参数计算

主波长 $0.88 \mu\text{m}$

入射角 = 出射角

公式为 $n_2 \sin\theta_2 + n_1 \sin\theta_1 = M\lambda T$

$$2 \sin\theta = 1 \times 0.88 \times 1.8$$

$$\therefore \theta = 52.3728^\circ$$

对波长 $0.855 \mu\text{m}$ 而言

$$\sin\theta_2 + \sin(52.373) = 1 \times 0.855 \times 1.8$$

$$\therefore \theta_2 = 48.33^\circ$$

同理对波长 $0.905 \mu\text{m}$

$$\text{衍射角 } \theta_3 = 56.825^\circ$$

探测器长度 20mm 代入公式

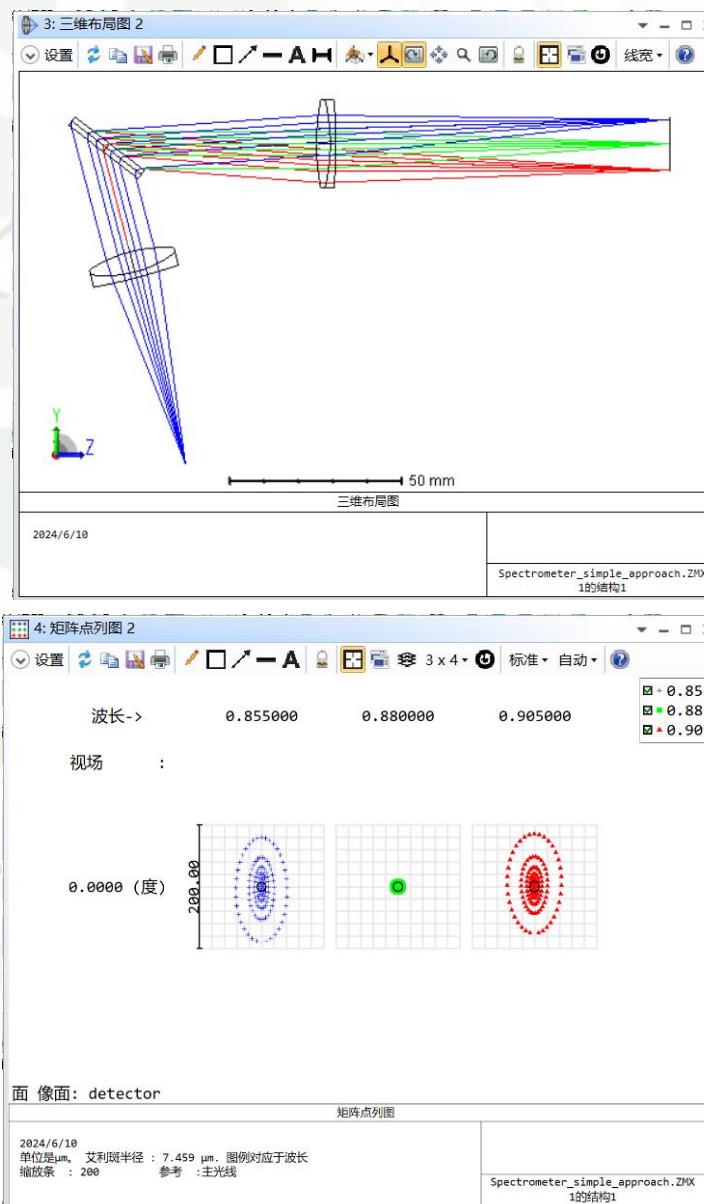
$$20 = f_f (\tan(4.4522) + \tan(+4.0428))$$

$$\therefore f_f = 134.6 \text{ mm}$$

若给探测器留些余量 照亮 18mm

$$\text{则 } f_f = 121.2 \text{ mm}$$

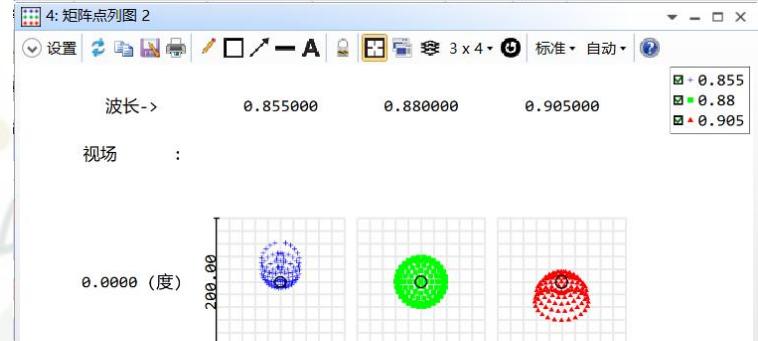
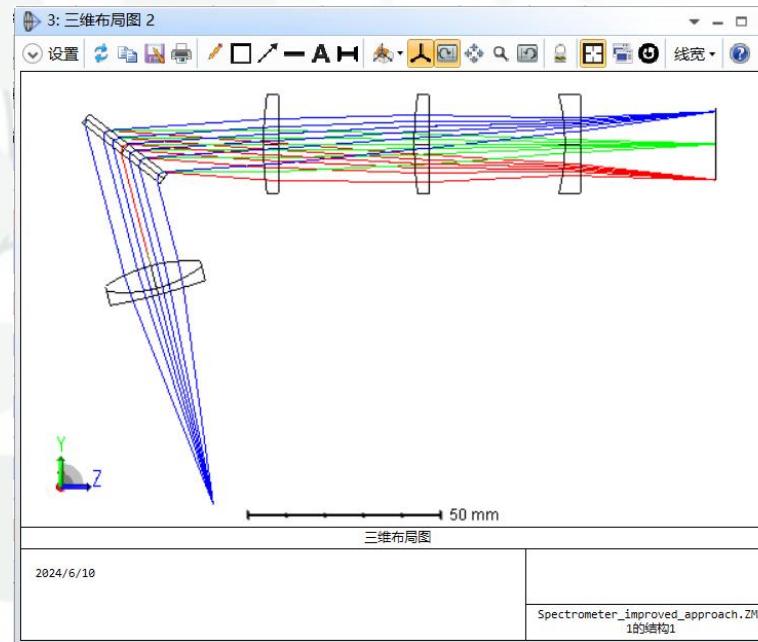
初始布局



	表面类型	标注	曲率半径	厚度	材料
0	物面	标准面 ▼	space fiber - collimating lens	无限	55.71821
1	光阑 (孔径)	标准面 ▼		165.20000	1.70000
2	(孔径)	标准面 ▼		33.00000	6.00000
3	(孔径)	标准面 ▼	AC254-060-B	-39.48000	0.00000
4		标准面 ▼	space collimator lens - grating	无限	30.00000
5		坐标间断 ▼			0.00000
6	(孔径)	标准面 ▼		无限	1.50000
7	(孔径)	衍射光栅 ▼		无限	1.50000
8	(孔径)	标准面 ▼		无限	0.00000
9		坐标间断 ▼			0.00000
10		标准面 ▼	space grating - focusing lens	无限	60.00000
11	(孔径)	标准面 ▼	AC254-100-B	66.68000	4.00000
12	(孔径)	标准面 ▼		-53.70000	1.50000
13	(孔径)	标准面 ▼		-259.410...	0.00000
14		标准面 ▼	space focusing lens - detector	无限	97.10000
15	像面	标准面 ▼	detector	无限	-

- 使用现成的镜片，因为它们比定制的镜片更便宜，出货速度更快。
 - 用单透镜代替消色差双胶合透镜，因为单透镜比双胶合透镜便宜。我们不需要校正色差，因为光栅可以分色。将通过倾斜探测器来修正不同颜色产生的不同焦距。
 - 使用最好的镜头。经过优化这种类型的透镜以聚焦点直光束。
 - 我们不使用单个透镜，而是使用两个透镜分散光焦度。这种方法有两个好处：(1)由于透镜的表面曲率较低，像差减小。(2)在系统中增加了一个厚度，可以在优化过程中将其设为变量。
 - 在聚焦透镜之后添加第三个发散透镜来减少场曲（平场镜）。

改进布局



面 像面: detector

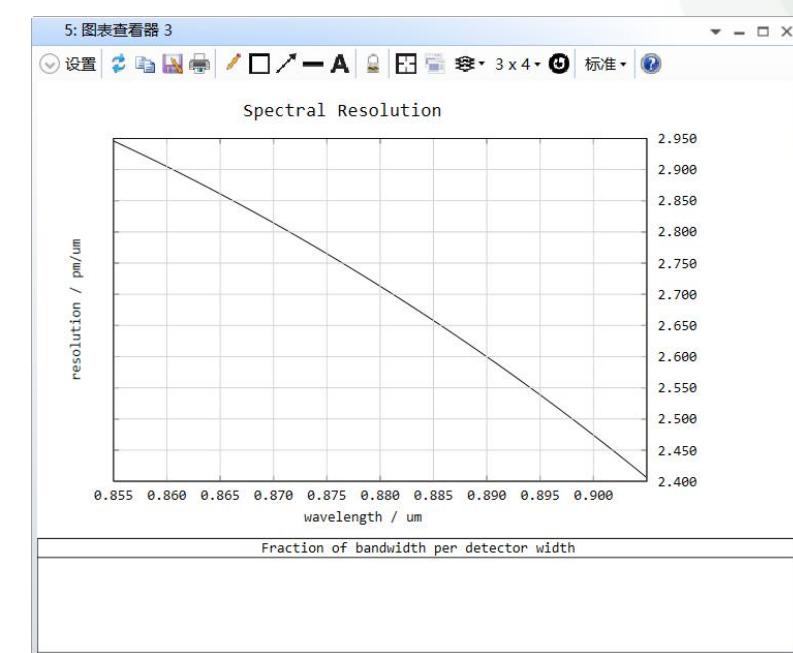
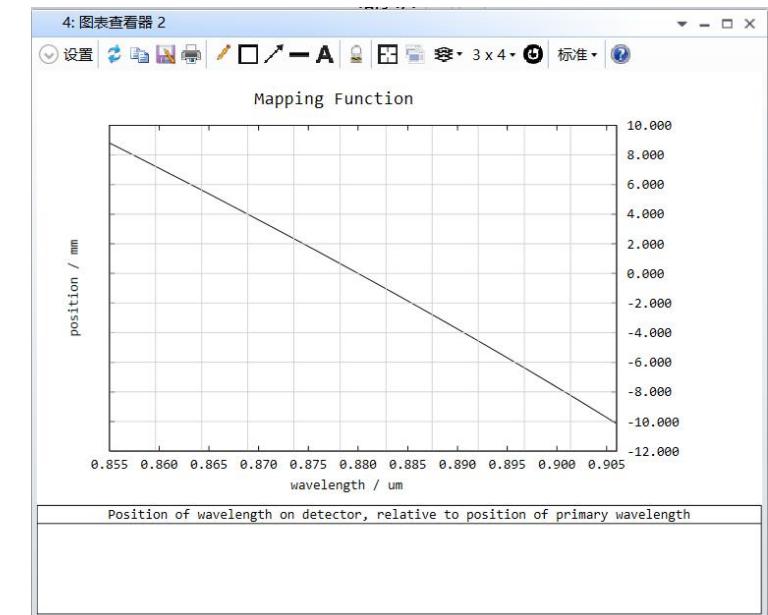
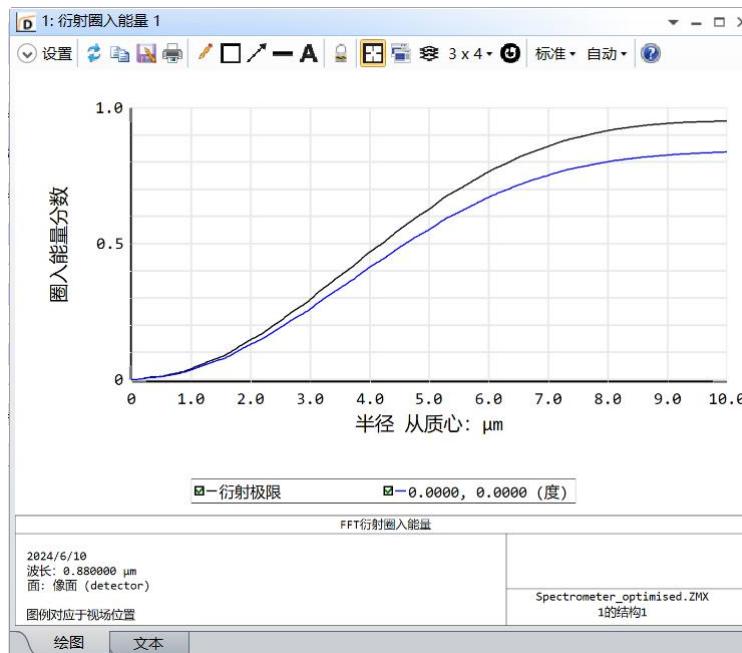
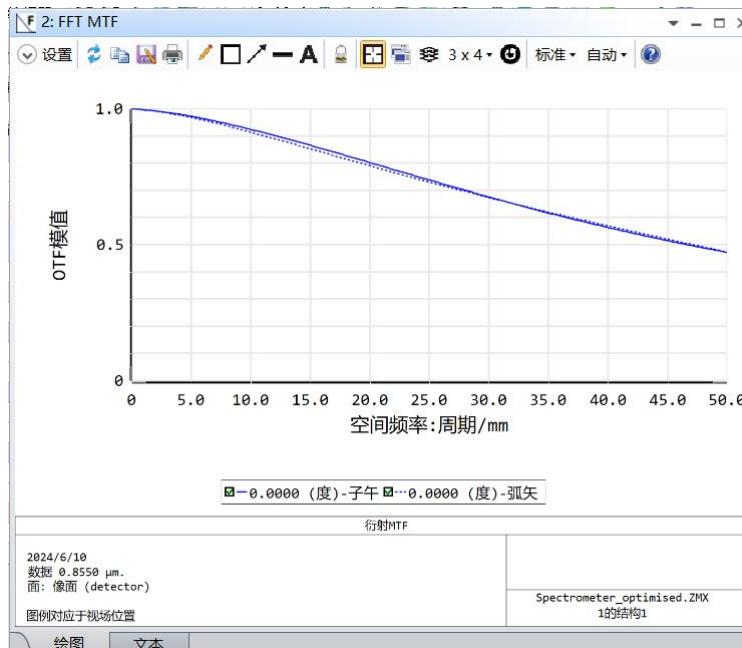
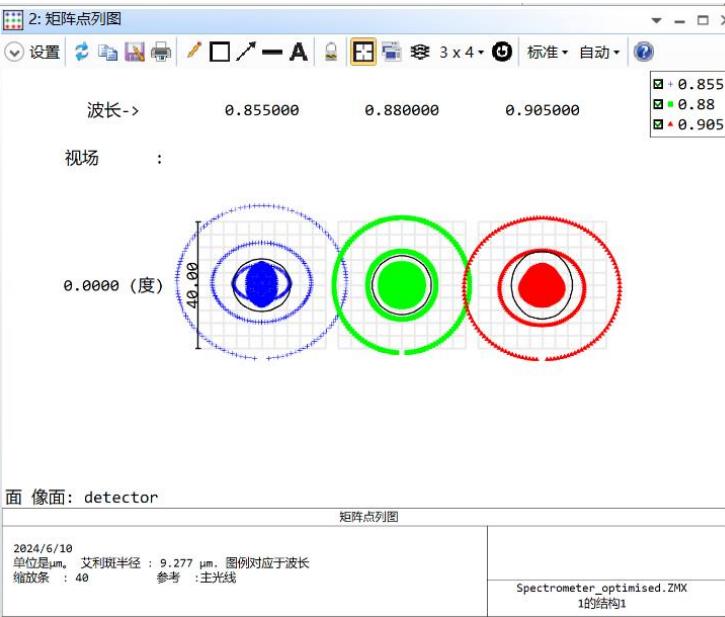
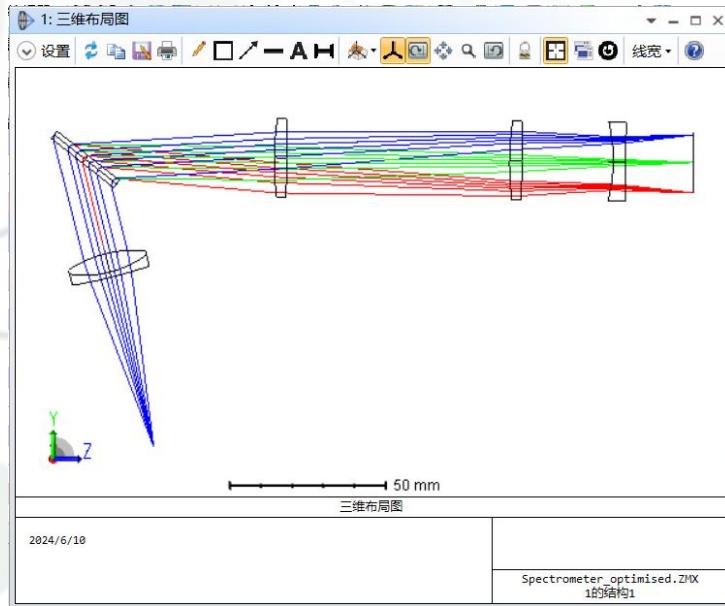
矩阵点列图

2024/6/10
单位是 μm 。艾利斑半径 : 8.93 μm 。图例对应于波长
缩放条 : 200 参考 : 主光线

Spectrometer_improved_approach.ZMX
1的结构1

	表面类型	标注	曲率半径	厚度	材料
0	物面	标准面 ▾	space fiber - collimating lens	无限	55.71821 V
1	光阑 (孔径)	标准面 ▾		165.20000	1.70000 N-SF6HT
2	(孔径)	标准面 ▾		33.00000	6.00000 N-LAK22
3	(孔径)	标准面 ▾	AC254-060-B	-39.48000	0.00000
4		标准面 ▾	space collimator lens - grating	无限	30.00000
5		坐标间断 ▾			0.00000 -
6	(孔径)	标准面 ▾		无限	1.50000 N-BK7
7	(孔径)	衍射光栅 ▾		无限	1.50000 N-BK7
8	(孔径)	标准面 ▾		无限	0.00000
9		坐标间断 ▾			0.00000 -
10		标准面 ▾	space grating - lens 1	无限	35.00000 V
11	(孔径)	标准面 ▾	LBF254-150-B	89.35000	4.00000 N-BK7
12	(孔径)	标准面 ▾		-570.49000	0.00000
13		标准面 ▾	space lens 1 - lens 2	无限	35.00000 V
14	(孔径)	标准面 ▾	LBF254-150-B	89.35000	4.00000 N-BK7
15	(孔径)	标准面 ▾		-570.49000	0.00000
16		标准面 ▾	space lens 2 - lens 3	无限	35.00000 V
17	(孔径)	标准面 ▾	LC1120-B	-51.46000	4.00000 N-BK7
18	(孔径)	标准面 ▾		无限	0.00000
19		标准面 ▾	space lens 3 - detector	无限	35.00000 V
20		坐标间断 ▾			0.00000 -
21	像面	标准面 ▾	detector	无限	-

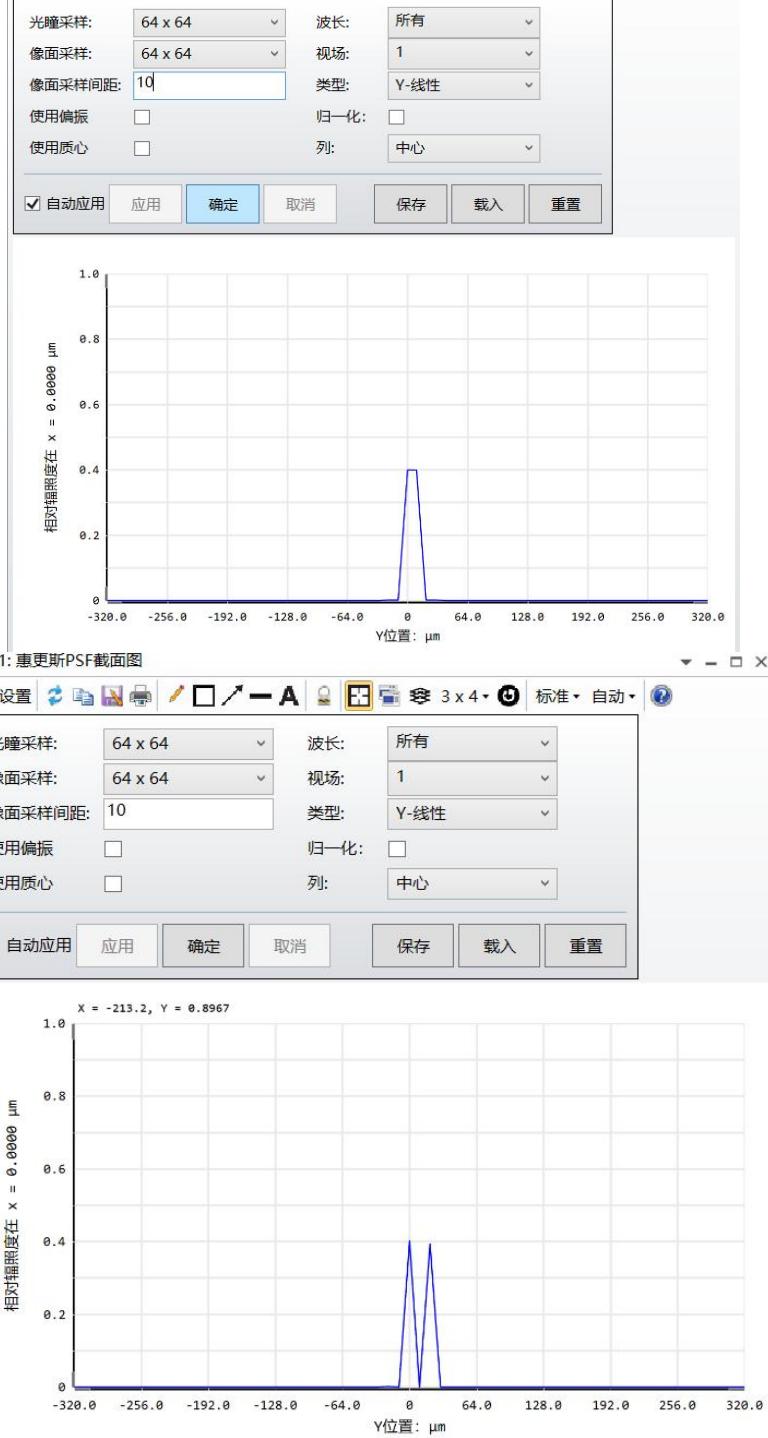
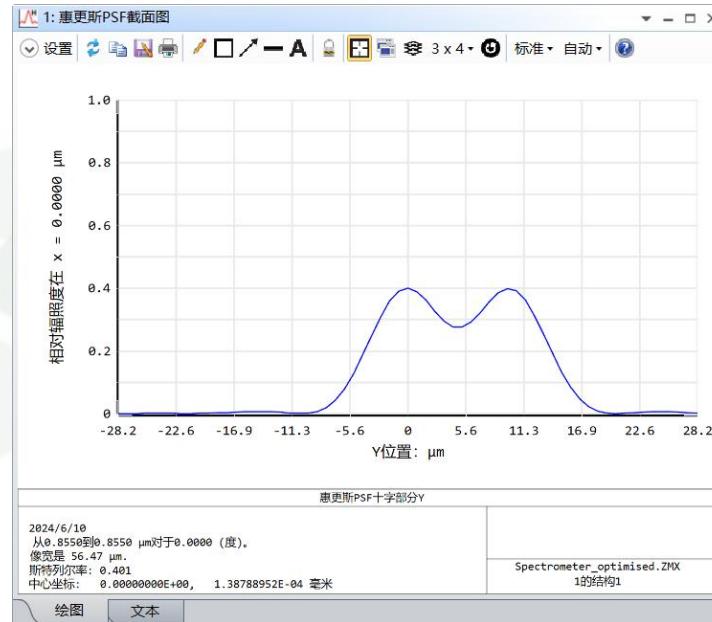
优化结果



分辨率

比如 $0.855\mu\text{m}$ 波长对应分辨率为 $2.95\text{pm}/\mu\text{m}$
像素大小 $10\mu\text{m}$
所以相邻像素间隔波长 $29.5\mu\text{m}$
所以对应于可以分开 $0.855\mu\text{m}$ 和 $0.8550295\mu\text{m}$

- ▶ 波长 1 ($0.855000 \mu\text{m}$, 权重 = 1.000000)
- ▶ 波长 2 ($0.855030 \mu\text{m}$, 权重 = 1.000000)

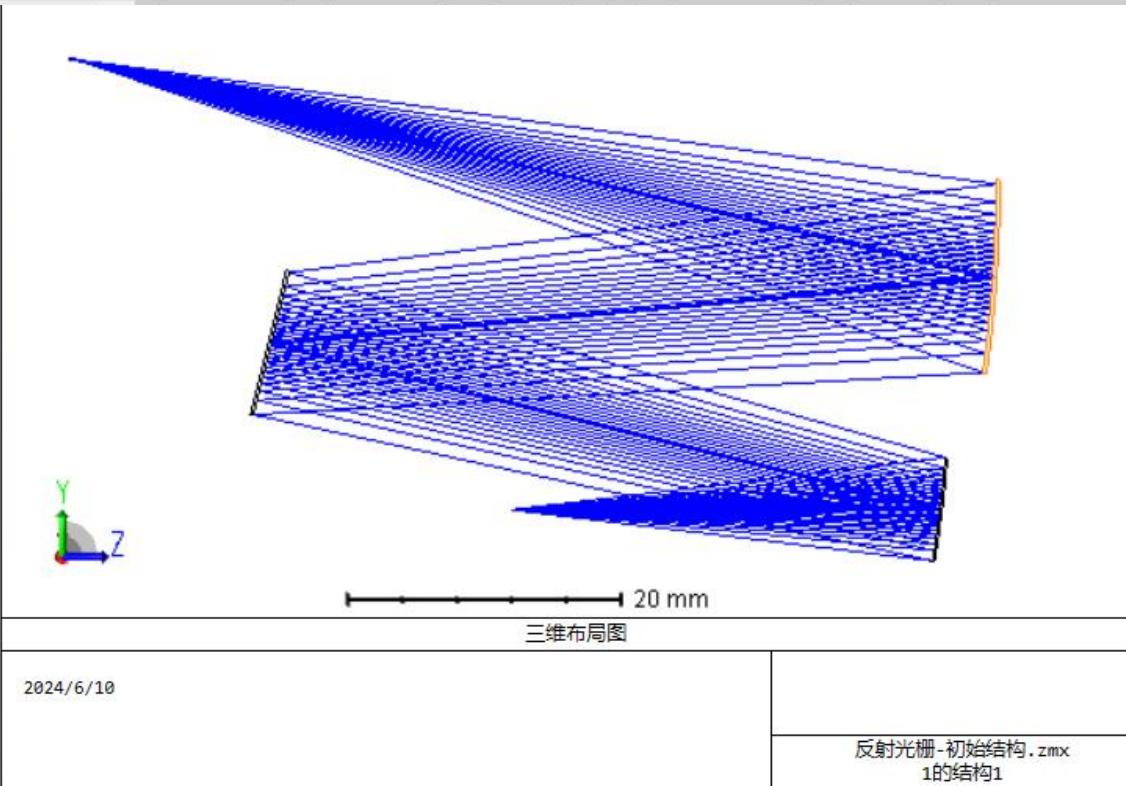


最终，我们的光谱仪的分辨率受线性阵列相机像素大小的限制，而不是衍射极限。最好用另一台具有4000个 $5\mu\text{m}$ 宽像素的线性阵列相机，以充分采样衍射极限点。不幸的是，这样的相机是不存在的。另一种方法是允许在光谱仪中出现更大的衍射极限大小。但是探测器会被过量照明，我们会失去光谱仪的部分带宽。

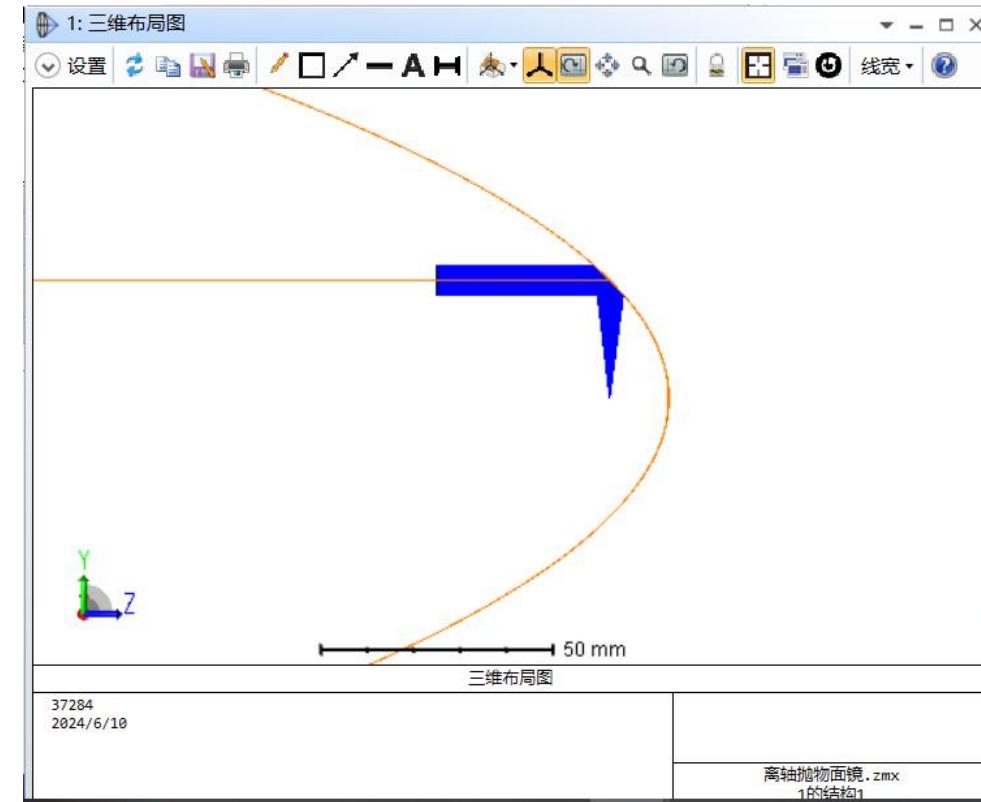
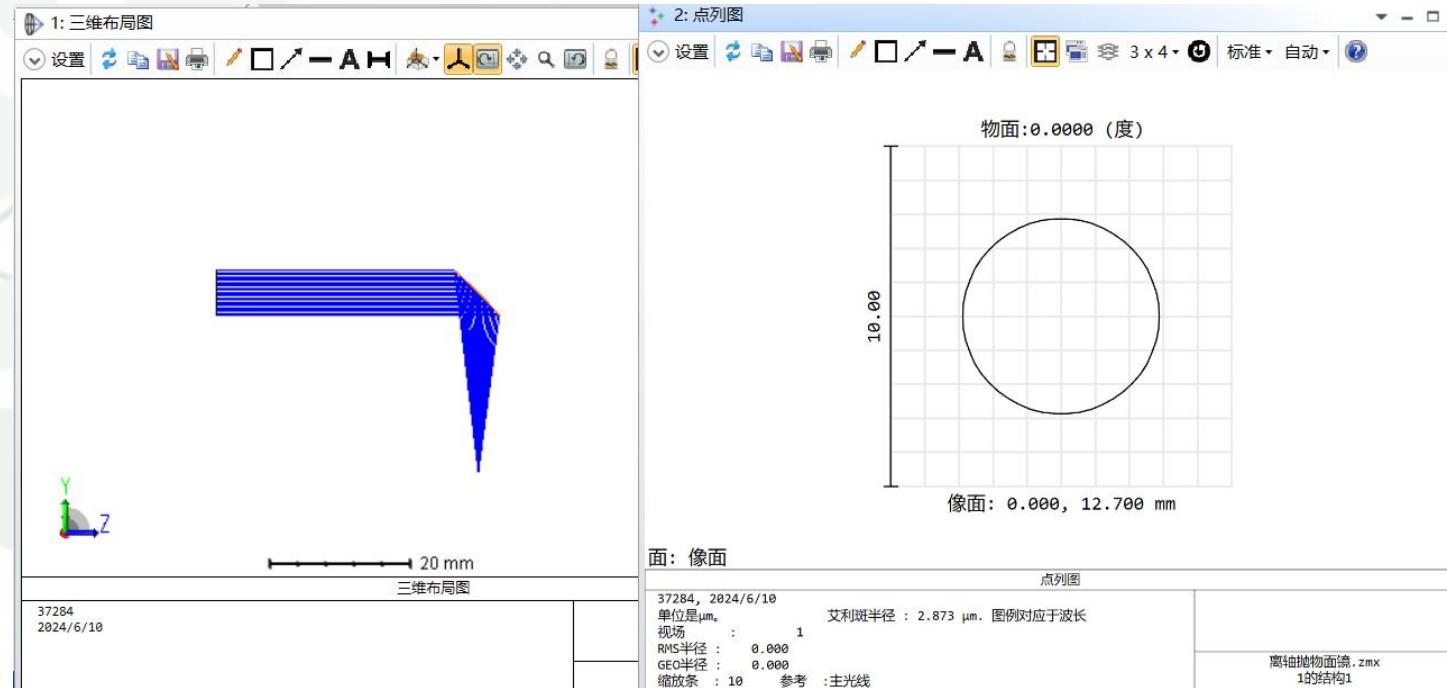
课后作业-反射式光谱仪设计

初始构型

	表面类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	净口径	延伸区	机械半直径	圆锥系数	TCE x 1E-6	参数 1(未使用)	参数 2(未使用)	参数 3(未使用)	参数 4(未使用)	参数 5(未使用)
0	物面 标准面 ▼		无限	31.30472			0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000					
1	坐标间断 ▼			0.00000	-		0.00000	-	-	-	0.00000	0.00000	7.00000	0.00000	0.00000	
2	光阑 标准面 ▼		-85.60430 V	-50.00000	MIRROR		3.84835	0.00000	3.84835	0.00000	0.00000					
3	坐标间断 ▼			0.00000	-		0.00000	-	-	-	0.00000	6.13923 C	7.00000	0.00000	0.00000	
4	衍射光栅 ▼		无限	50.00000	MIRROR		5.42157	-	-	0.00000	0.00000	0.60000	1.00000			
5	坐标间断 ▼			0.00000	-		0.00000	-	-	-	0.00000	17.47917 C	-10.00000	0.00000	0.00000	
6	标准面 ▼		-104.37289 V	-68.38454	MIRROR		7.14935	0.00000	7.14935	0.00000	0.00000					
7	坐标间断 ▼			0.00000	-		0.00000	-	-	-	0.00000	11.16013 C	0.00000	0.00000	0.00000	
8	像面 标准面 ▼		无限	-			0.11665	0.00000	0.11665	0.00000	0.00000					



离轴抛物面镜



<https://www.edmundoptics.cn/f/aluminum-off-axis-parabolic-mirrors/39488/>