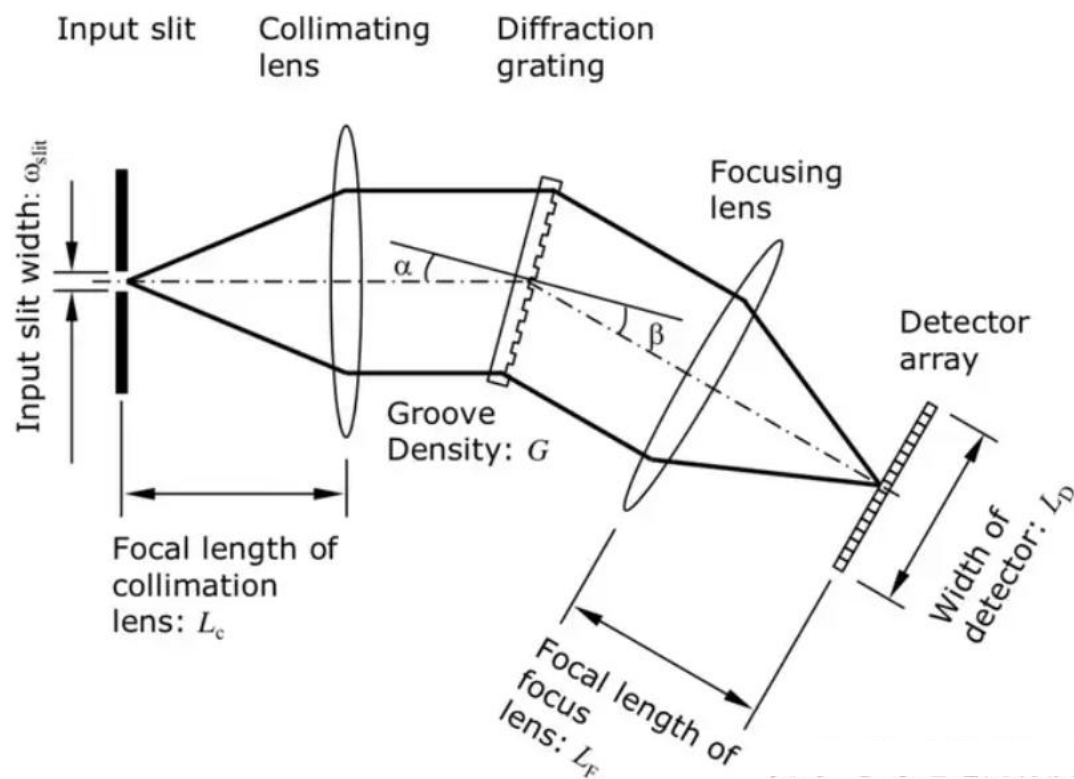




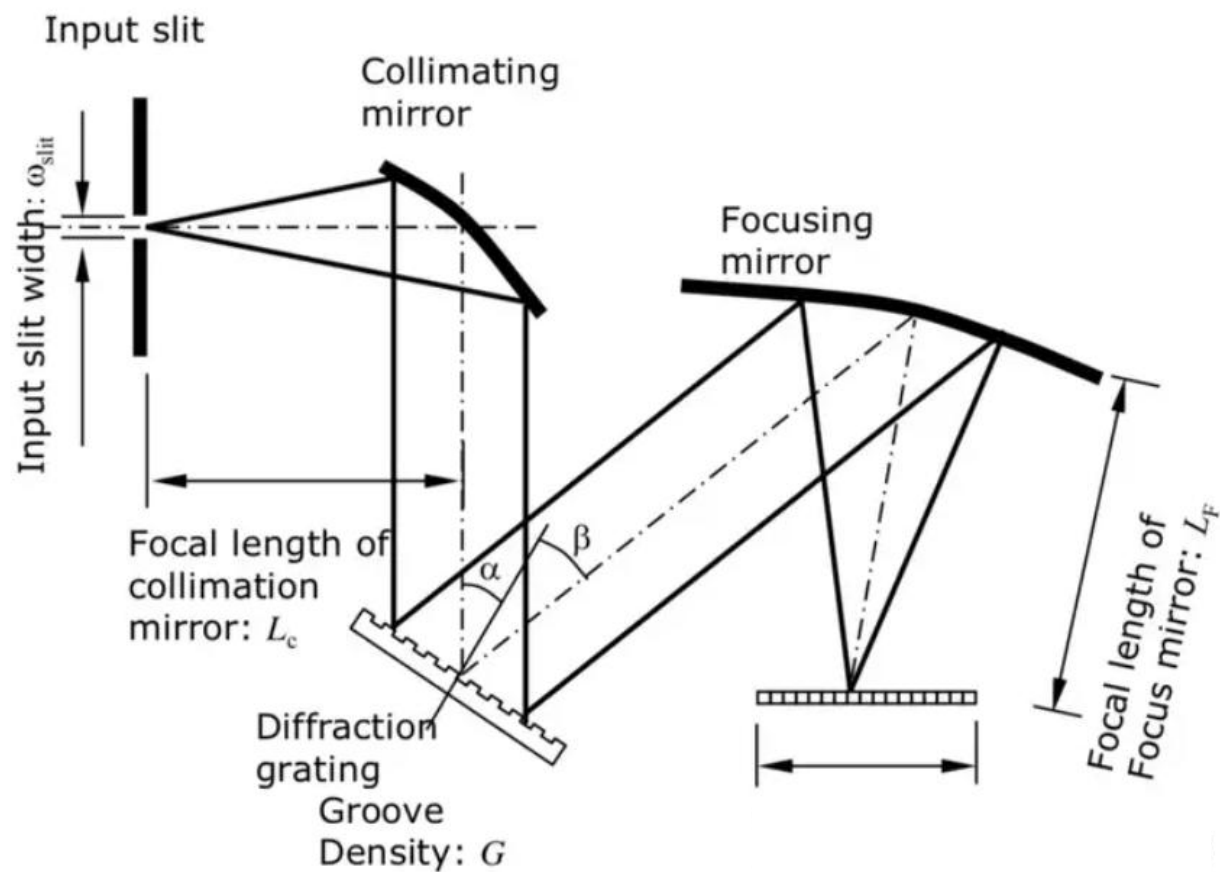
橡树小姐的 光学设计小课堂

——光谱仪

光谱仪的基本结构

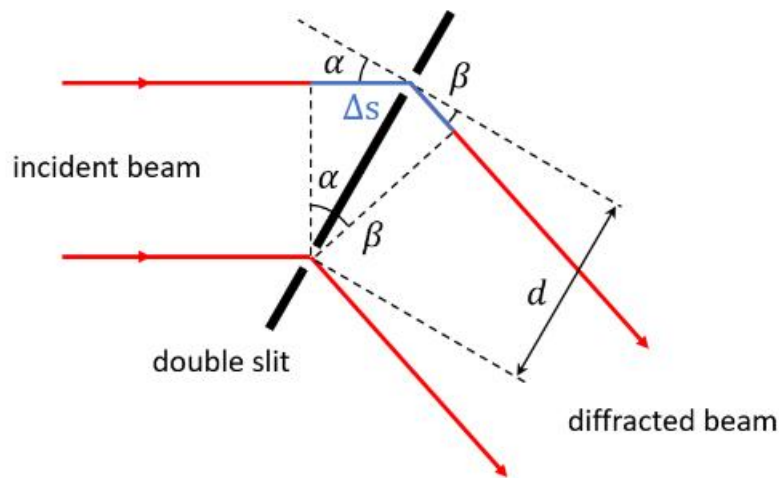
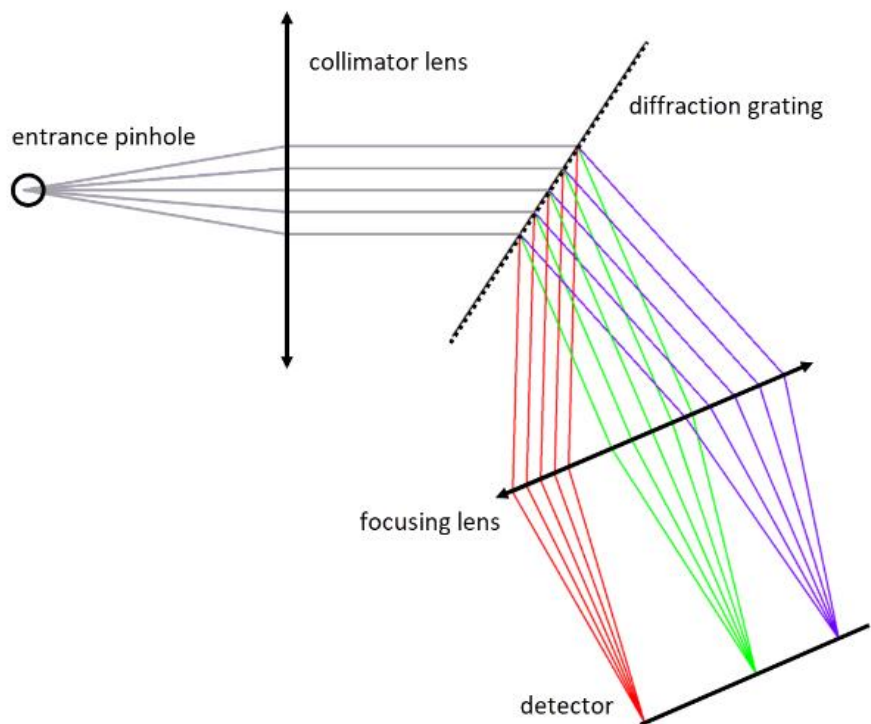


透镜—光栅—透镜(LGL)光谱仪模型



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



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

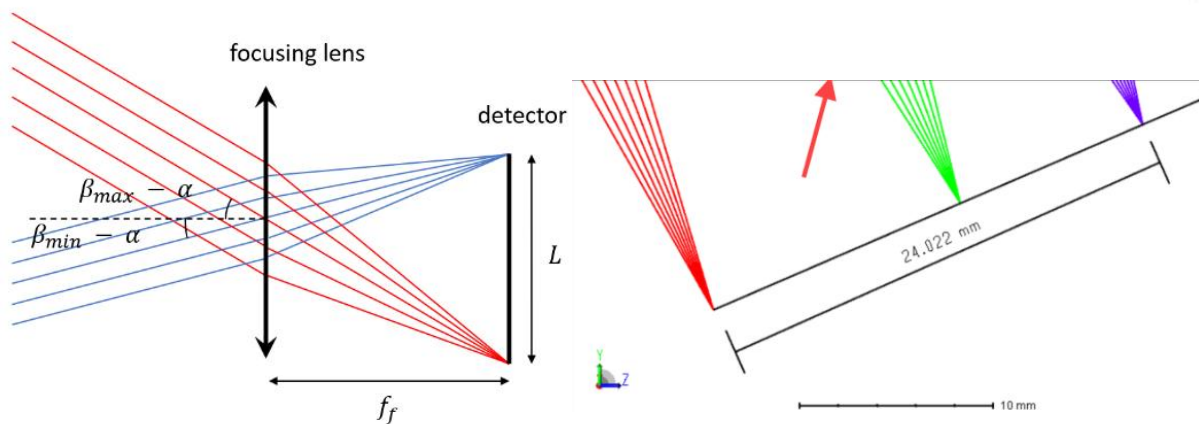
$$\Delta s = \lambda$$

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

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

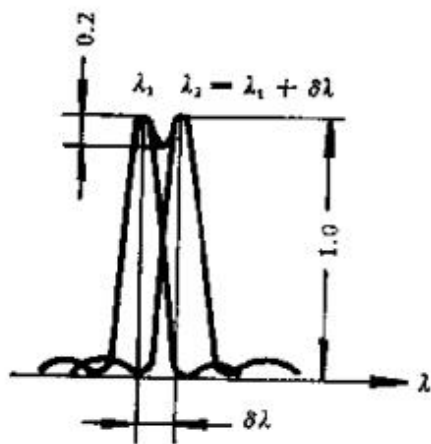
$$L = f_f (\tan(\beta_{max} - \alpha) + \tan(\beta_{min} - \alpha))$$

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。

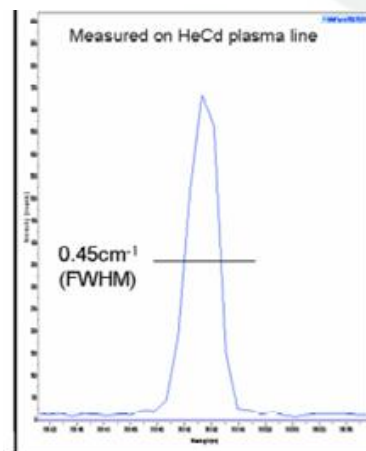
能够区分开的标准遵循瑞利准则, 当两条强度分布轮廓相同的谱线底最大值和最小值重合时, 能够被分辨



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%)

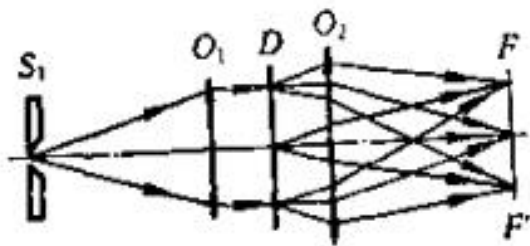
另一种说法: 光谱分辨率是指探测器在波长方向上的记录宽度, 又称波段宽度 (band width)。光谱分辨率被严格定义为仪器达到光谱响应最大值的50%时的波长宽度 (FMHW)。本质也是瑞利准则, 尤其适用于高光谱成像。



光栅光谱仪的分辨率

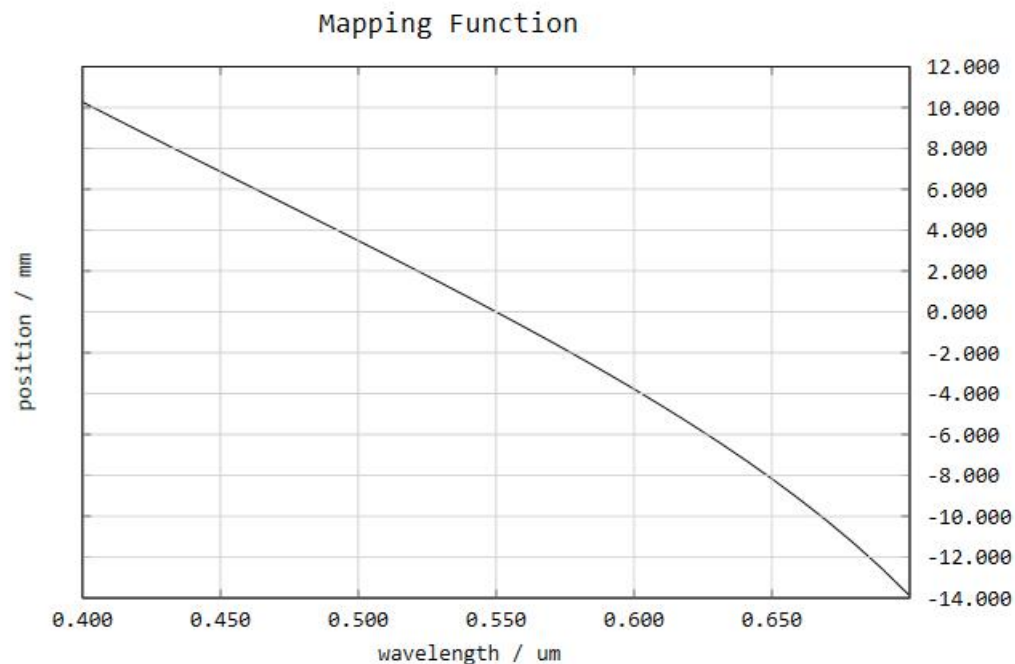
- 首先，要想实现最高的光谱分辨率，相邻的两个波长一定是落在探测器相邻的两个像素上。
- 其次，光学系统的成像能力要能够清晰分辨该大小的像素，所以光学系统的点列图RMS半径要小于像素大小，或者MTF在该像素大小的截止频率下大于0.3甚至0.5

提高分辨率的方法：



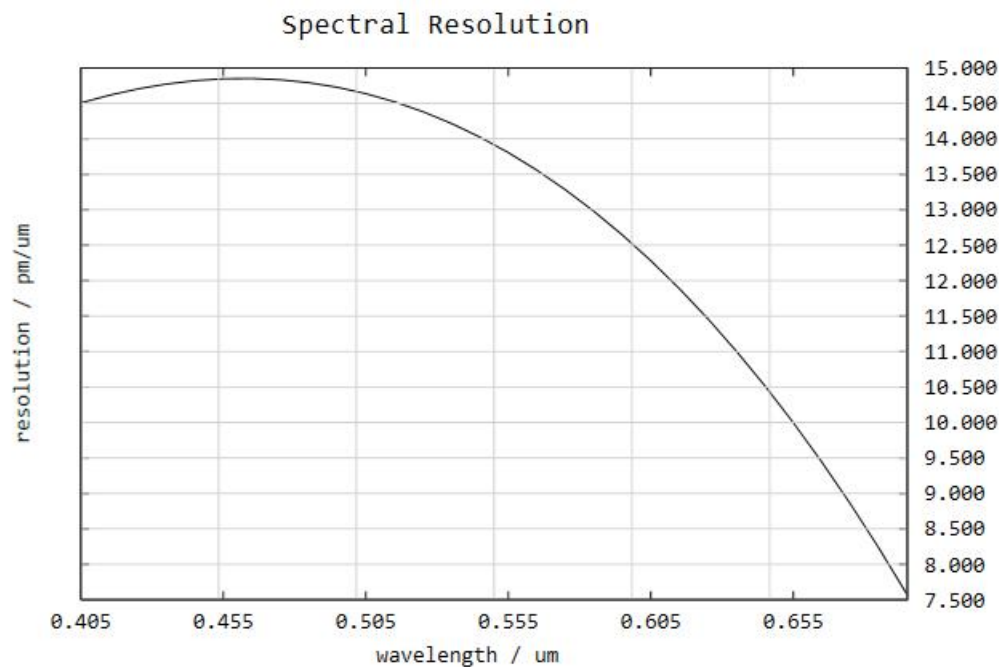
- 光谱仪可以看作是将物体（入射针孔，即点光源）映射到像面（探测器）的光学系统。
所以狭缝越窄，分辨率越高，但是狭缝变窄光强就会降低，并且有衍射极限的影响；
- 各波长的光在探测器上分的越开，分辨率越高，所以光栅刻线越密，分辨率越高，但会受到衍射极限的影响；
- 各波长的光在探测器上分的越开，分辨率越高，所以聚焦透镜的焦距越长分辨率越高，但是会引起体积增大；
- 探测器像素越小，所能实现分辨率越高，但是探测器像素大小受衍射极限的影响，小于艾里斑半径是没有用的。
- 所以要综合考虑狭缝尺寸、光栅刻线、聚焦透镜焦距、探测器宽度以及像素大小等

光栅光谱仪的分辨率



$$L = f(\lambda)$$

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



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
```

定义波长范围和
采集步长

```
! 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
```

定义数值矩阵大小

```
! Set MC operand to change Wavelength 1  
SETMCOPIRAND 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  
  SETMCOPIRAND 1, 1, wavelength, 0  
  SETCONFIG 1  
  RAYTRACE 0, 0, 0, 0, 1  
  yf = RAYY(9)  
  wavelengths(i+1) = wavelength  
  y_positions(i+1) = yf
```

采用多重结构遍历波长，并
记录该波长在探测器的位置

```
  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  
  ENDOF
```

计算分辨率， $d\lambda/dL$

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

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

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	10μm
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

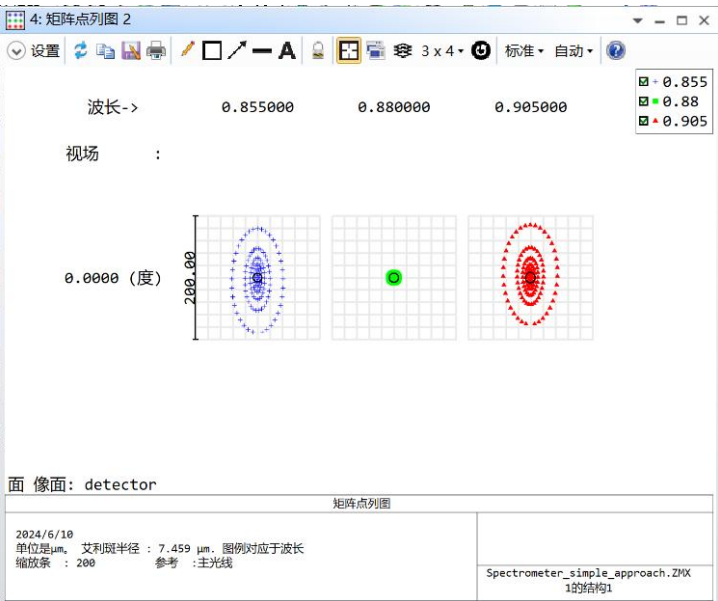
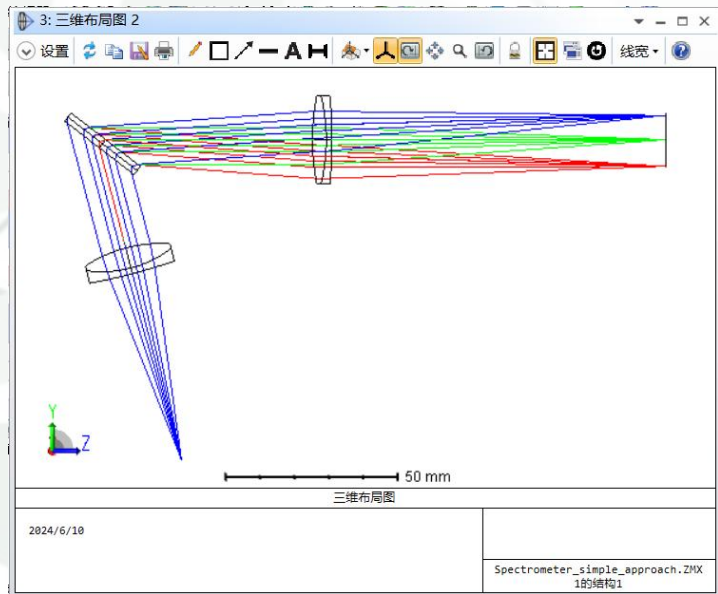
$$20 = f_f (\tan(4.4522) + \tan(+4.0428))$$

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

若给探测器留些余量 照亮 18mm

$$\text{则 } f_f = 121.2\text{ mm}$$

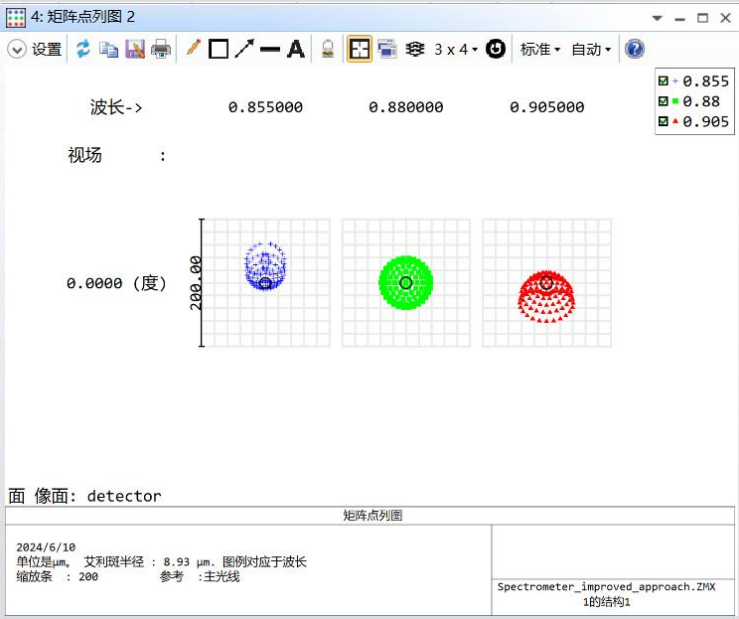
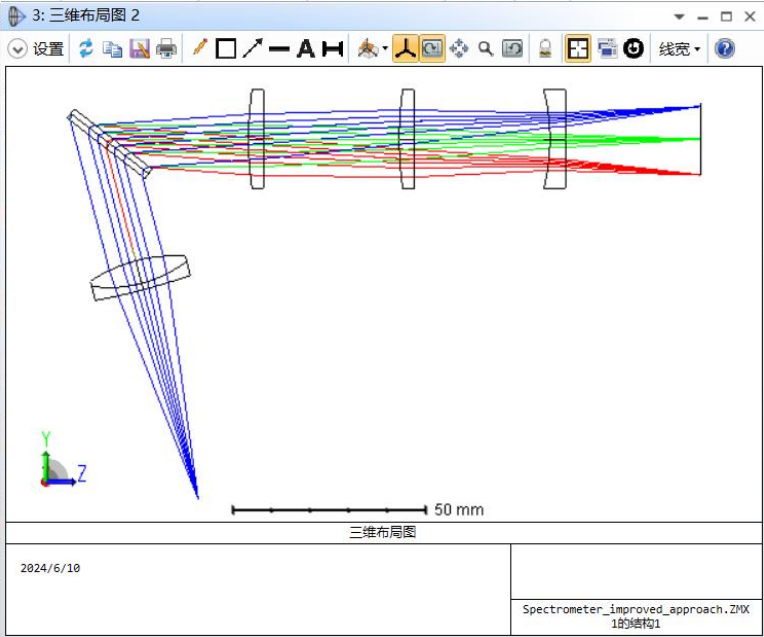
初始布局



	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	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 - focusing lens	无限	60.00000	
11	(孔径)	标准面 ▼	AC254-100-B	66.68000	4.00000	N-LAK22
12	(孔径)	标准面 ▼		-53.70000	1.50000	N-SF6HT
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	-	

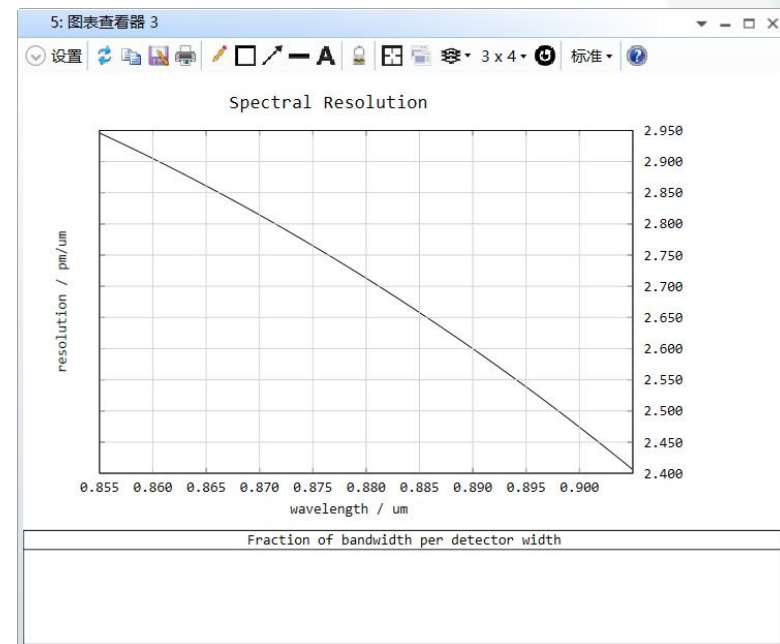
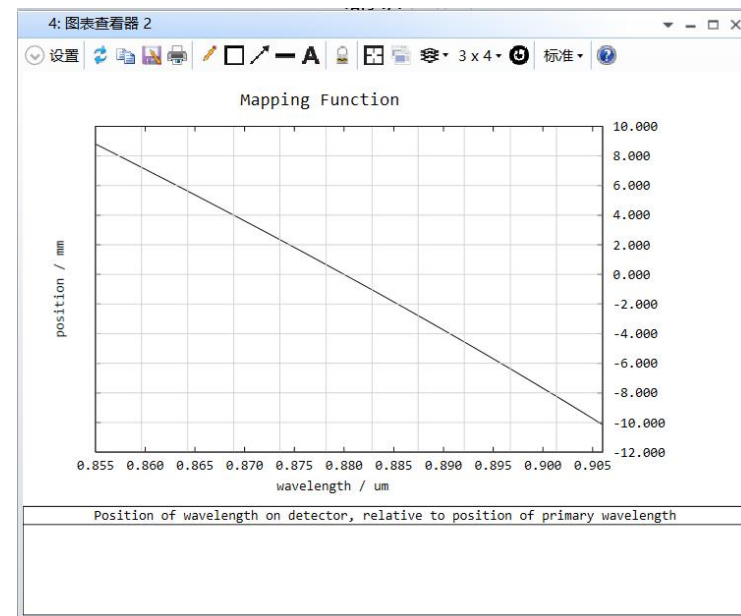
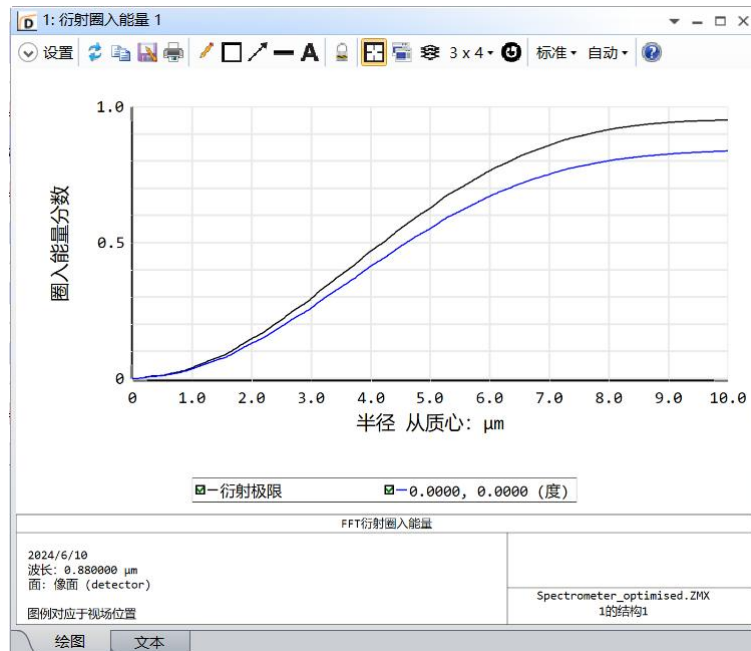
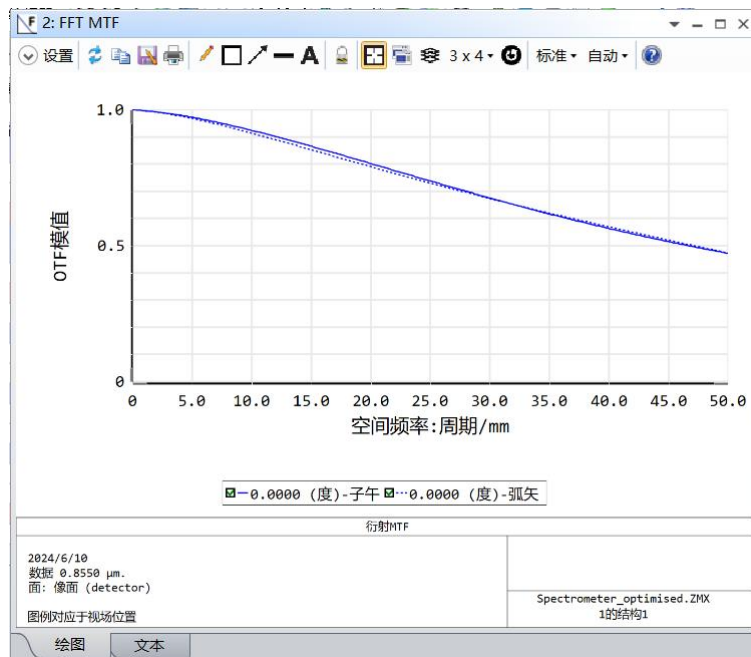
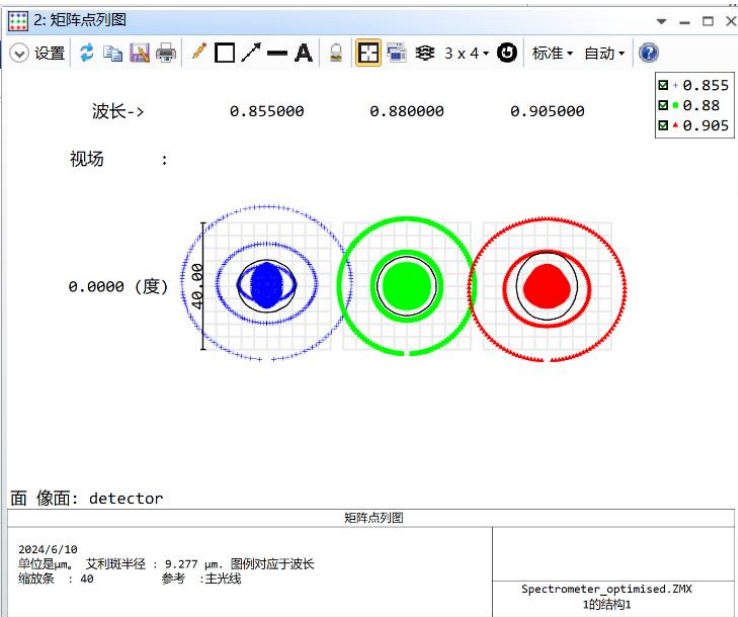
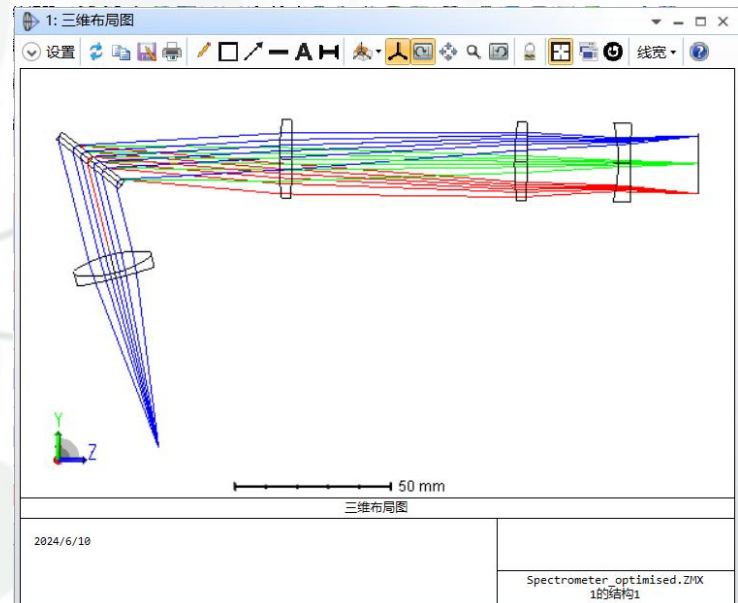
- 使用现成的镜片，因为它们比定制的镜片更便宜，出货速度更快。
- 用单透镜代替消色差双胶合透镜，因为单透镜比双胶合透镜便宜。我们不需要校正色差，因为光栅可以分色。将通过倾斜探测器来修正不同颜色产生的不同焦距。
- 使用最好的镜头。经过优化这种类型的透镜以聚焦准直光束。
- 我们不使用单个透镜，而是使用两个透镜分散光焦度。这种方法有两个好处：(1)由于透镜的表面曲率较低，像差减小。(2)在系统中增加了一个厚度，可以在优化过程中将其设为变量。
- 在聚焦透镜之后添加第三个发散透镜来减少场曲（平场镜）。

改进布局



	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

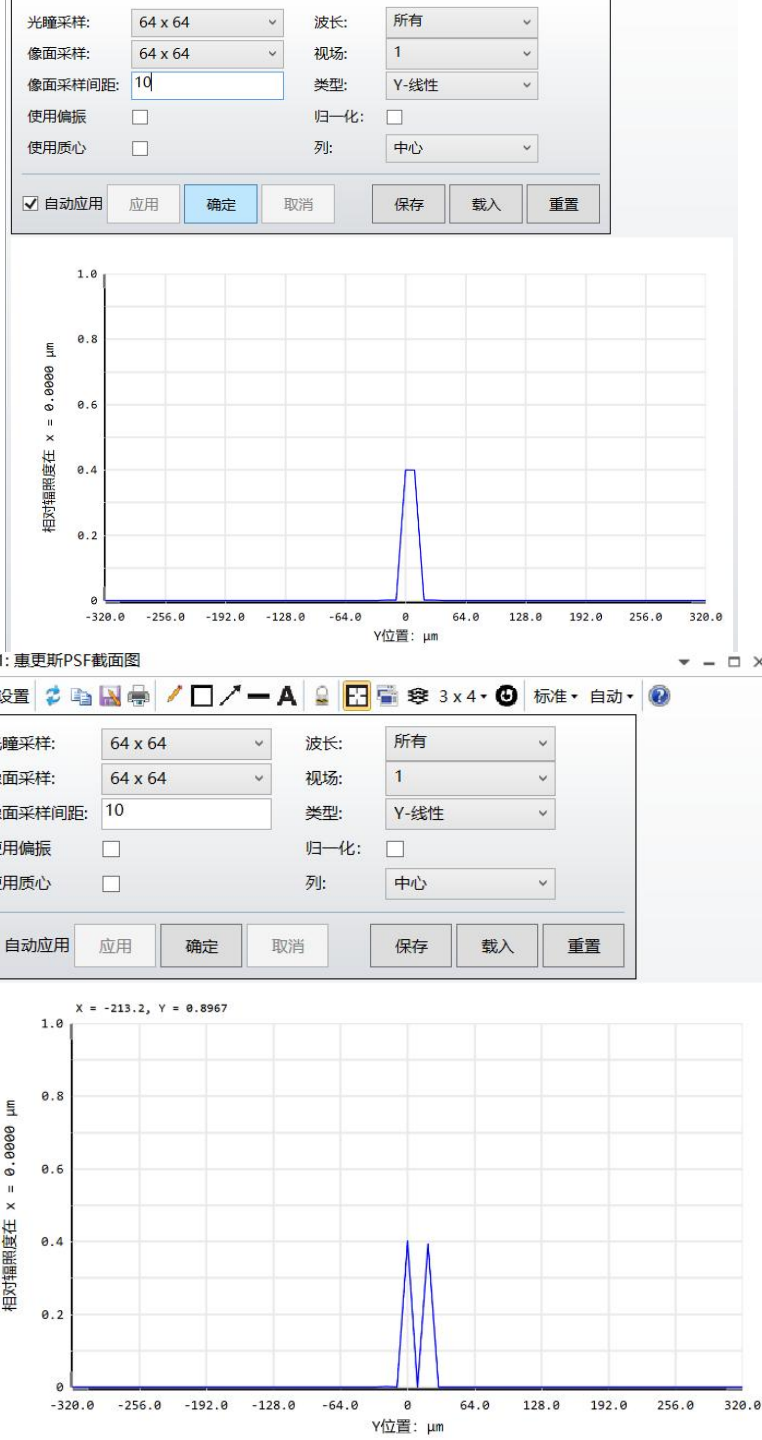
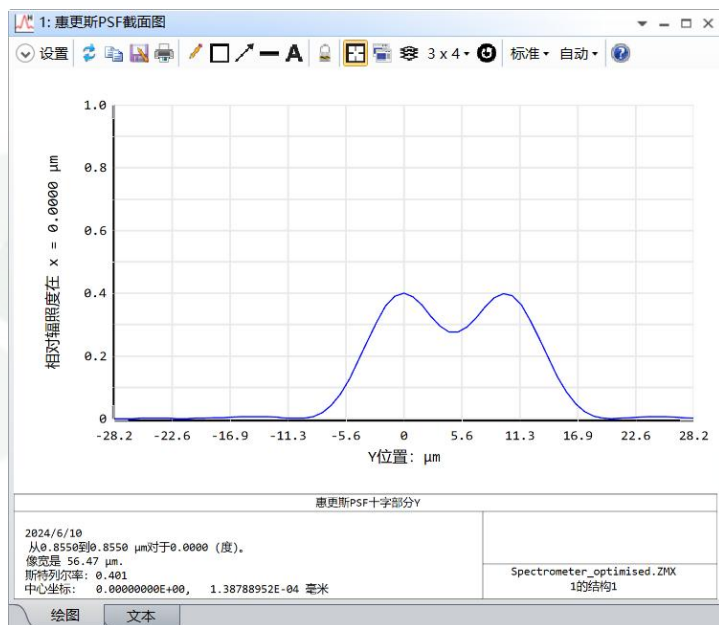
比如0.855μm波长对应分辨率为2.95pm/μm

像素大小10μm

所以相邻像素间隔波长29.5μm

所以对应于可以分开0.855μm和0.8550295μm

- ▶ 波长 1 (0.855000 um, 权重 = 1.000000)
- ▶ 波长 2 (0.855030 um, 权重 = 1.000000)

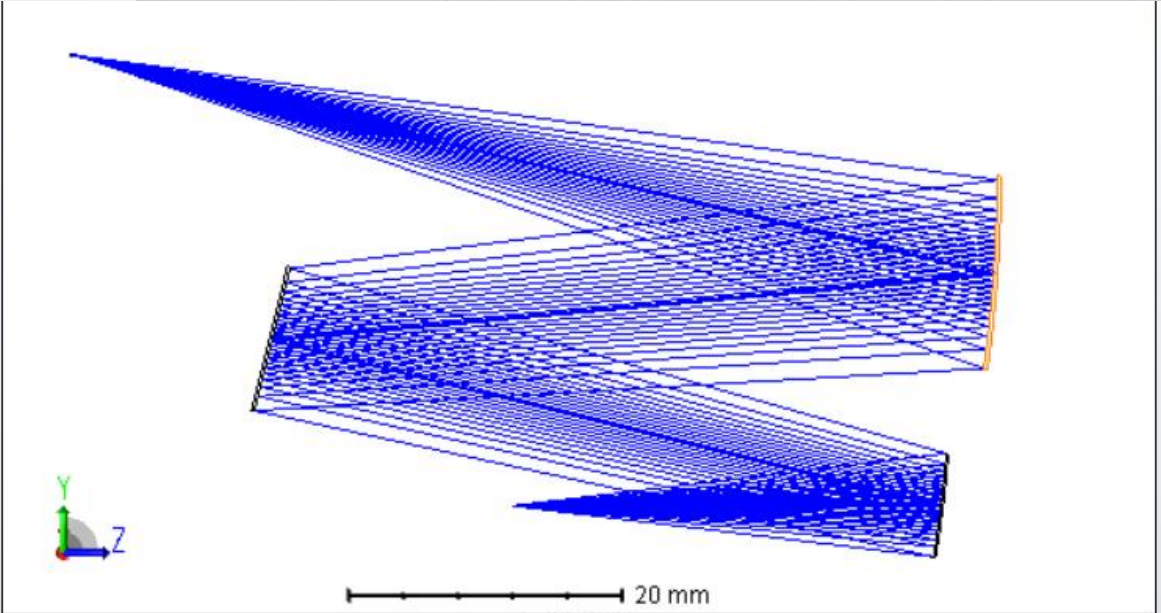


最终，我们的光谱仪的分辨率受线性阵列相机像素大小的限制，而不是衍射极限。最好用另一台具有4000个5um宽像素的线性阵列相机，以充分采样衍射极限点。不幸的是，这样的相机是不存在的。另一种方法是允许在光谱仪中出现更大的衍射极限大小。但是探测器会被过量照明，我们会失去光谱仪的部分带宽。

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	坐标切断		0.00000	-		0.00000	-	-		-	0.00000	0.00000	7.00000	0.00000	0.00000
2 光源	标准面	-85.60430 V	-50.00000	MIRROR		3.84835	0.00000	3.84835	0.00000	0.00000					
3	坐标切断		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	坐标切断		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	坐标切断		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					

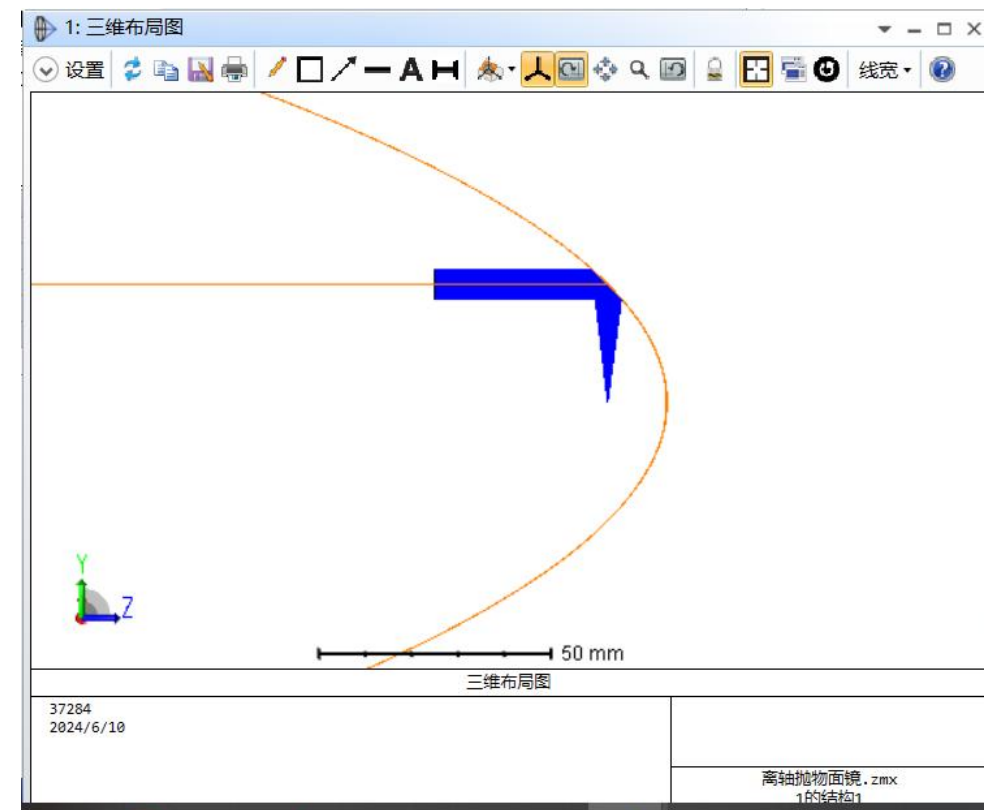
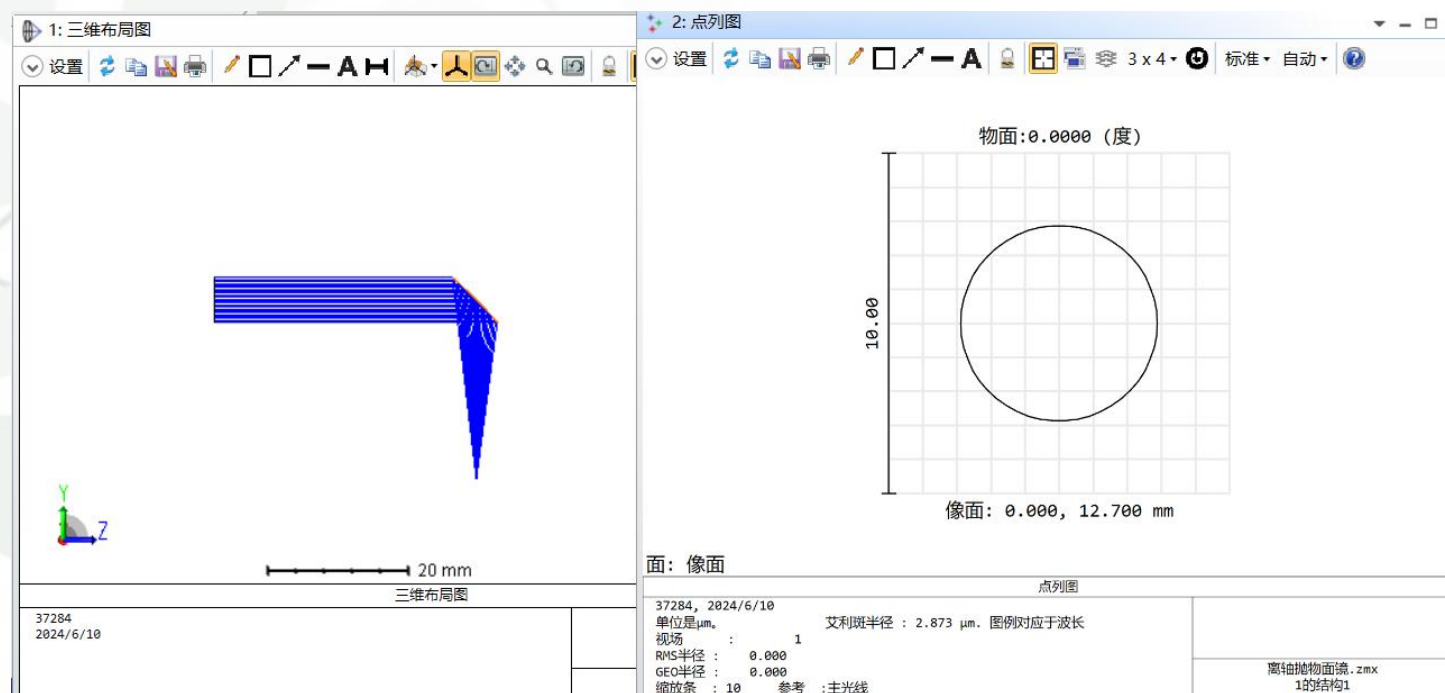


三维布局图

2024/6/10

反射光栅-初始结构.zmx
1的结构1

离轴抛物面镜



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