

## 五、 光学设计

安徽创谱仪器科技有限公司根据客户的技术指标要求，已完成光学系统核算和优化，最终的光学设计方案如下。

### 5.1 设计要求

表 5.束线指标要求

序号	项目	验收指标	内部指标	
			主线	支线
1	光谱范围	5~200 nm 6~250 eV	1.2~50 nm 25~1000 eV	40~200 nm 6~31 eV
2	波长重复精度	0.01 nm @ 13.5 nm	机构重复性按 1/2000 波长重复性设计	
3	分辨本领	1000 @ 13.5 nm	1000 @ 13.5 nm 全波段 >800	全波段 >800
4	光谱纯度	≥ 90%	滤片	气体滤波
5	新建反射率计	φ1m, 1×10 <sup>-5</sup> Pa		
6	光子通量 (photons/s)	/	8×10 <sup>10</sup> @ 120 eV 3×10 <sup>9</sup> @ 200 eV, 500 eV	3×10 <sup>10</sup> @ 14 eV 5×10 <sup>10</sup> @ 25 eV

### 5.2 光源特性

#### 5.2.1 NSRL 机器参数

$$E = 0.8 \text{ GeV} \quad I = 300 \text{ mA}$$

$$\epsilon_x = 38 \text{ nm.rad} \quad \epsilon_y = 1.9 \text{ nm.rad}$$

表 6.第四块弯铁（B4）15°角处束流参数

Length	1.7m
B	1.23T
ρ	2.16451m
θ	45°
15°偏角处束流参数	
$\beta_x$	0.923 m
$\beta_y$	7.686 m

$\alpha_x$	1.378
$\alpha_y$	-2.100
$\gamma_x$	3.142 (1/m)
$\gamma_y$	0.703 (1/m)
$\eta_x$	0.279 m
$\eta'_x$	-0.475
$\sigma_x$	0.229mm
$\sigma'_x$	0.412 mrad
$\sigma_y$	0.121mm
$\sigma'_y$	0.0366mrad

## 5.2.2 光源性能

在弯铁光源中，由于圆周运动的电子在水平方向的辐射是均匀的，因而可以用单位水平毫弧度内每秒的光谱通量（phs/s/mrad.300mA.0.1%bw）得到光通量与能量之间的关系，称为通量谱，可写成下面的形式：

$$\frac{dF_B}{d\theta} = 2.457 \times 10^{13} E [GeV] I [A] y \int_y^{\infty} K_{5/3}(y') dy'$$

下图给出了系统在不同水平接收角的情况下的光子通量。

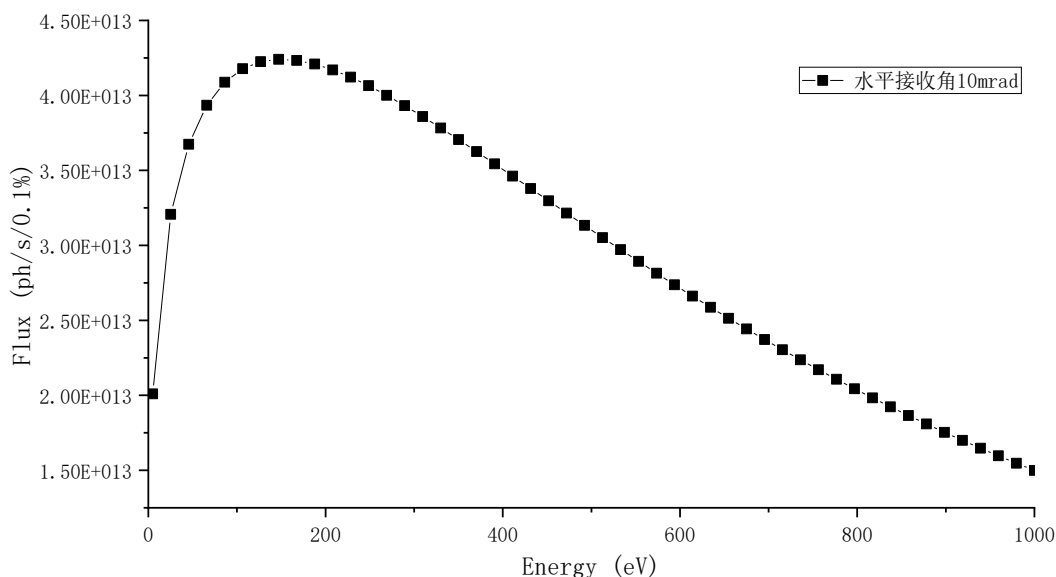


图 11.光子通量(photon/sec/0.1%b.w.@300mA)

利用 shadow 软件追迹弯铁发出的光的光斑大小，如下图所示，光斑尺寸  $0.542 \times 0.285 \text{mm}^2$  (FWHM)。

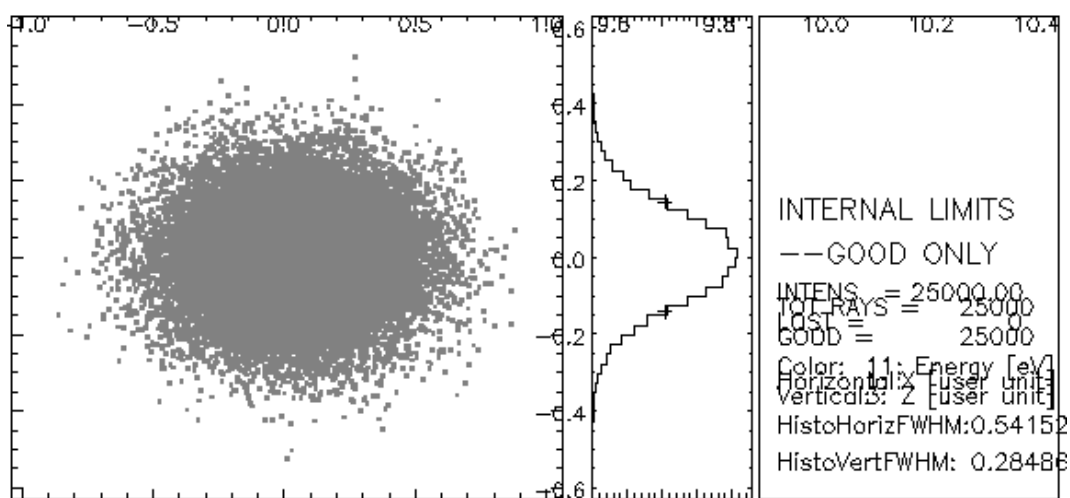
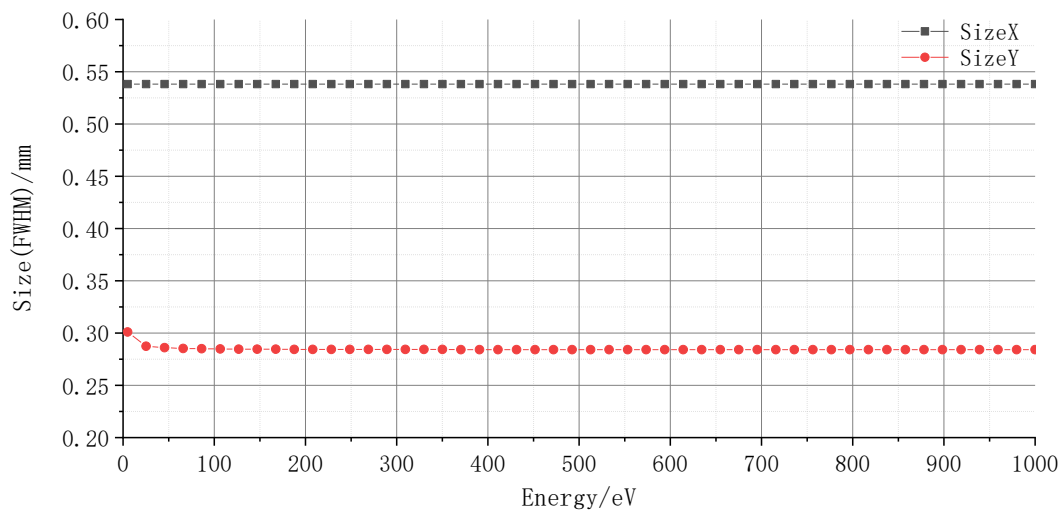


图 12.光源尺寸 (FWHM:  $0.542 \times 0.285 \text{mm}^2$ )

下图为不同能量情况下垂直发散角，在低能量处的垂直发散角较大，而到 100eV 以上，其垂直接收角基本不变。

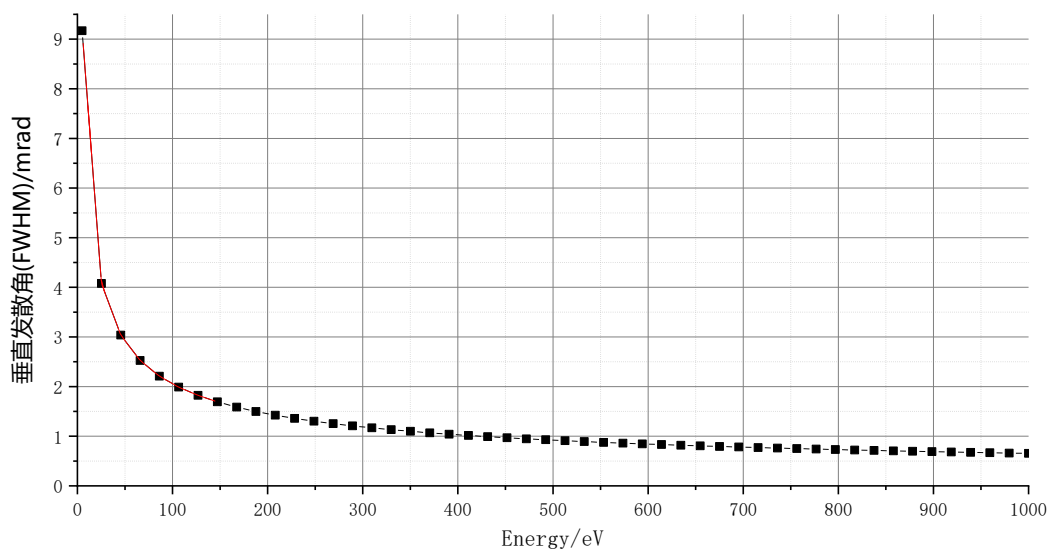


图 13.光源发散角

## 5.3 光束线总体布置

光束线分主线和支线设计，按光谱范围，其中：

主线：针对短波段，覆盖波长 1.2-50nm，对应能量范围 25-1000eV，采用自聚焦平面光栅单色器（SF-VLS-PGM）；

支线：针对长波段，覆盖波长 40-200nm，对应能量范围 6-31eV，采用 C-T 型光栅单色器设计，用气体滤波抑制高次谐波。

光束线单色器采用光栅公称线密度参数及能量范围分布如下：

表 7.光束线能量范围

	光栅线密度 (1/mm)	能量范围 (eV)	波长范围 (nm)
主线	300	25-150	8.2~50
	1400	100-1000	1.24-12.4
支线	300	6-12	200-103
	600	11-31	112-40

表 8.光束线验收指标

序号	项目	验收指标	内部指标	
			主线	支线
1	光谱范围	5 – 200 nm 6 – 250 eV	1.2 – 8 – 50 nm 25 – 1000 eV	40 – 100 – 200 nm 6 – 12 – 31 eV
2	波长重复精度 @ 13.5 nm	0.01 nm	机构重复性按 1/2000 波长重复性设计	
3	分辨本领	1000 @ 13.5 nm	1000 @ 13.5nm 全波段>800	全波段>800
4	光谱纯度	≥ 90%	滤片	气体滤波
5	新建反射率计	φ1 米, 1×10 <sup>-5</sup> Pa		
6	光子通量 (photons/s)	/	8×10 <sup>10</sup> @ 120eV 3×10 <sup>9</sup> @ 200eV, 500eV	3×10 <sup>10</sup> @ 14eV 5×10 <sup>10</sup> @ 25eV

下图为束线的总体布局图，从弯铁发出的光，每条分支线分别利用其中 5mrad 的水平发散角，两条分支线的中心夹角 25mrad。

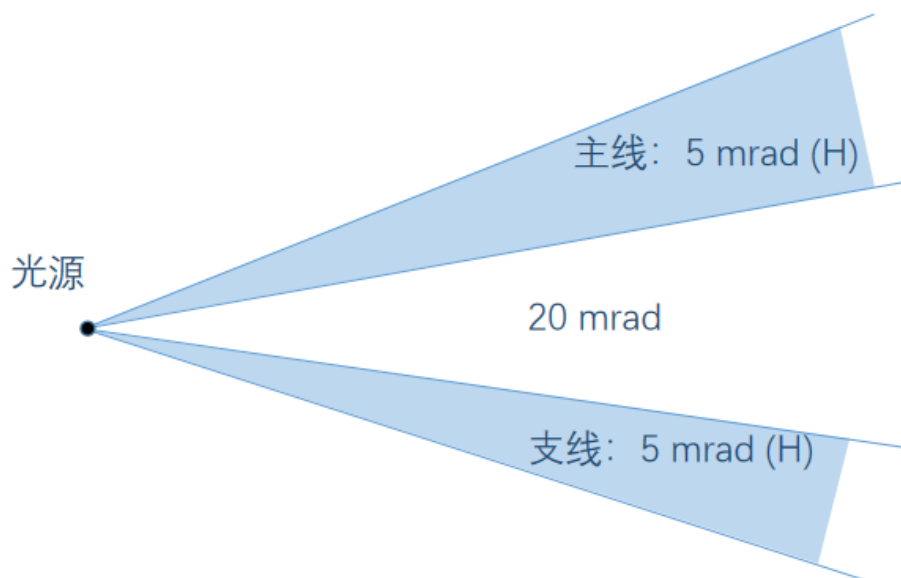


图 14.两条束线布局

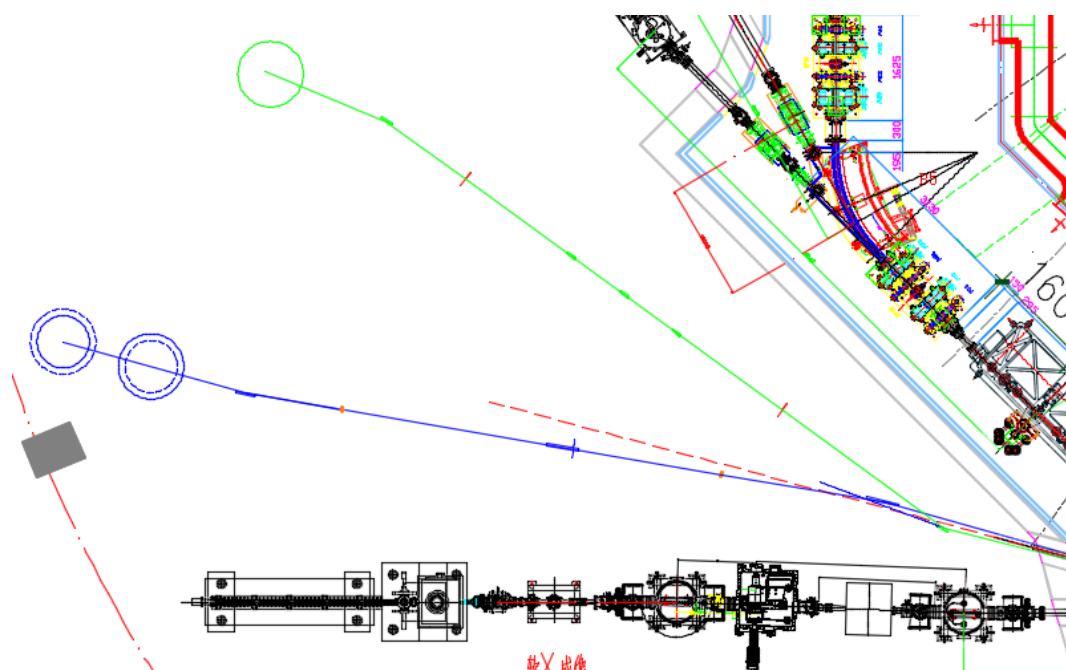


图 15.束线总体布局图

## 5.4 主线物理设计

### 5.4.1 光学系统设计

光学系统示意图见下图。前置镜接收角为 4.5mrad(水平)×1.4mrad (竖直)。从光源发出的光以 3°入射竖直安装的距离光源 6000 mm 的前置聚焦镜 M1,将光在系统竖直方向以 2:1 聚焦

在入射狭缝 S1 上，在水平方向聚焦在出射实验站处。所有光学元件表面镀 Au。

从入射狭缝出射的光入射单色器内的平面镜，其反射光打在 300 l/mm 或 1400l/mm 中心线密度的变间距光栅（VLS-PG）中心，出射光聚焦在出射狭缝上。25-150eV 使用 300 l/mm 中心线密度，100-1000eV 使用 1400 l/mm 中心线密度。后置镜球面镜或柱面镜，将出射狭缝光斑聚焦到实验站处。光束线整体长度约为 18.5 m。

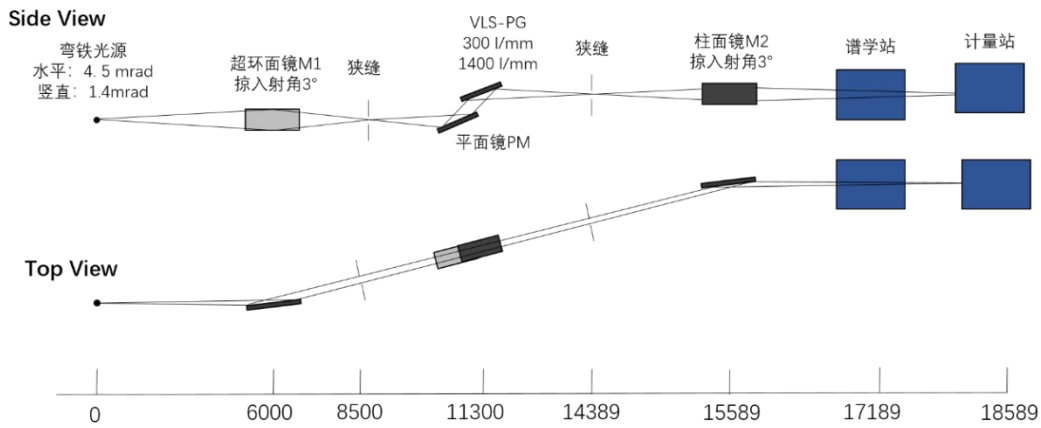


图 16.主线光路布置图

## 5.4.2 变线距参数

自聚焦光栅单色器中，分光光学元件为变线距光栅，变间距平面光栅中从光栅中心到坐标  $w$  处刻线总数可以表示为：

$$N = N_0 (1 + a_1 w + a_2 w^2 + a_3 w^3 + \dots)$$

$w$  的方向定义为逆着光路的方向， $n_0$  是展开系数。

对于 1400l/mm 光栅，覆盖 100~1000eV。59.37 eV 处光栅包含角  $2K=160^\circ$ ，600eV 处光栅包含角  $2K=173.787^\circ$ ，且在 200eV 处消除慧差，计算得到：

$$a_1 = -8.245 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}, a_2 = 3.002 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2};$$

300 l/mm 光栅，覆盖 25~150eV。25eV 处光栅包含角  $2K=160^\circ$ ，150eV 处光栅包含角  $2K=171.88^\circ$ ，且在 90 eV (13.6 nm) 处消除光栅慧差，计算得到：

$$a_1 = -1.426 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}, a_2 = 2.712 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2};$$

## 5.4.3 光学系统参数

平面镜的掠入射角  $\theta = (180^\circ - (\alpha + \beta))/2$ ，根据光栅方程求出不同能量时候的入射角  $\alpha$ 、出射角  $\beta$  以及平面镜的掠入射角  $\theta$  和光栅接收角  $\phi$ （光栅按 180mm 计算）。如下图所示，如果考虑将平面镜和光栅转至水平位置，平面镜的转动范围为  $10.0^\circ$ ，光栅转动范围为  $12.5^\circ$ 。整个系统

垂直接收角主要限制因素为光栅尺寸，在低能段由于光栅入射角相对较小，则垂直接收角相对较大，而在高能段系统的垂直接收角较小。

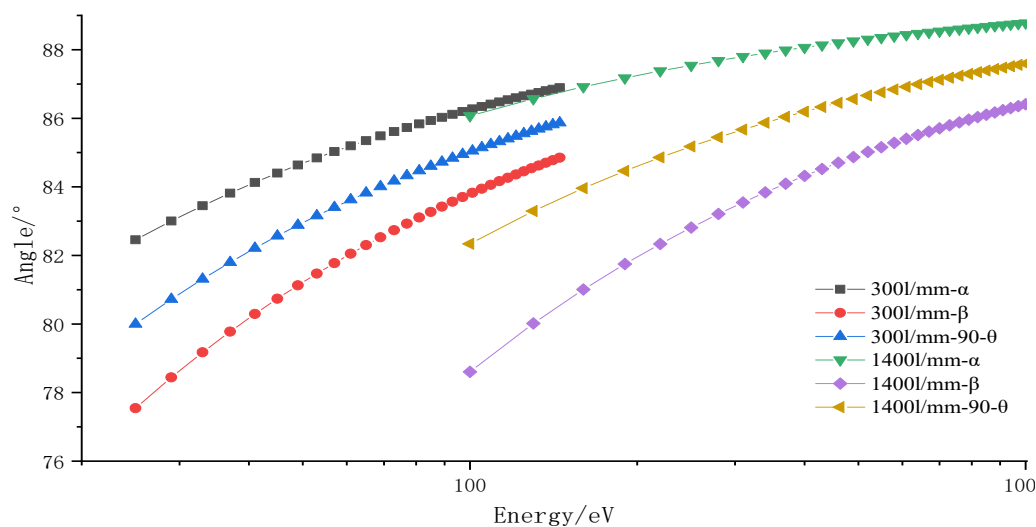


图 17.光栅的入射角、衍射角以及平面镜的掠入射角

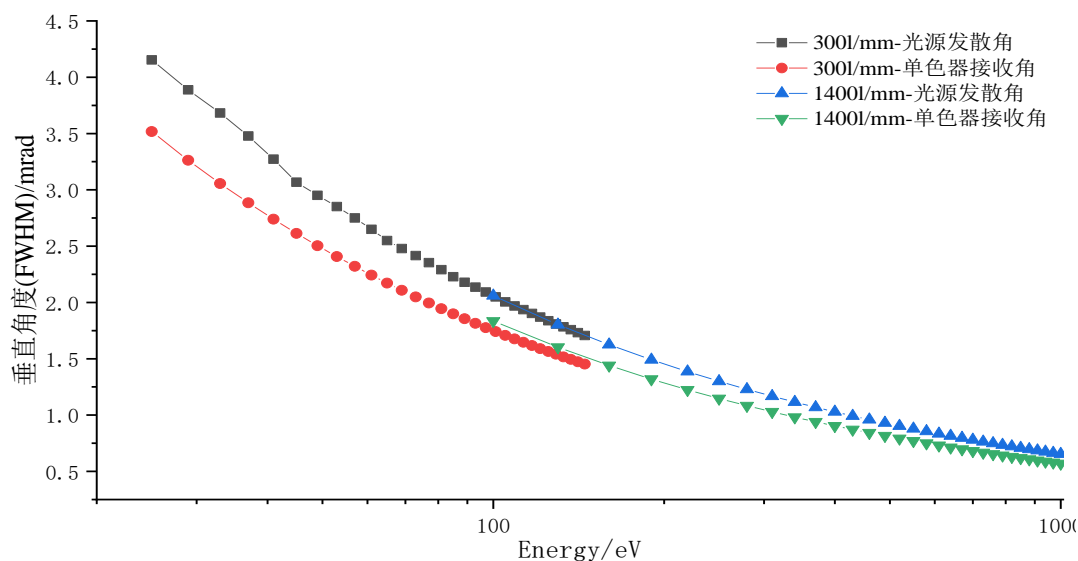


图 18.不同能量对应的垂直接收角

#### 5.4.4 光学系统分辨率

在光栅单色器中光谱展宽的来源于像差、入射狭缝、出射狭缝、元件面型误差、衍射极限等。根据系统设置，前置系统收光缩放聚焦后，理论上在入射狭缝处的光斑为  $120\mu\text{m}$ ，考虑到超环面镜像差的因素，实际的光斑尺寸会比理论值大，如下图所示，追迹结果显示光斑尺寸接近  $200\mu\text{m}$  (FWHM)。

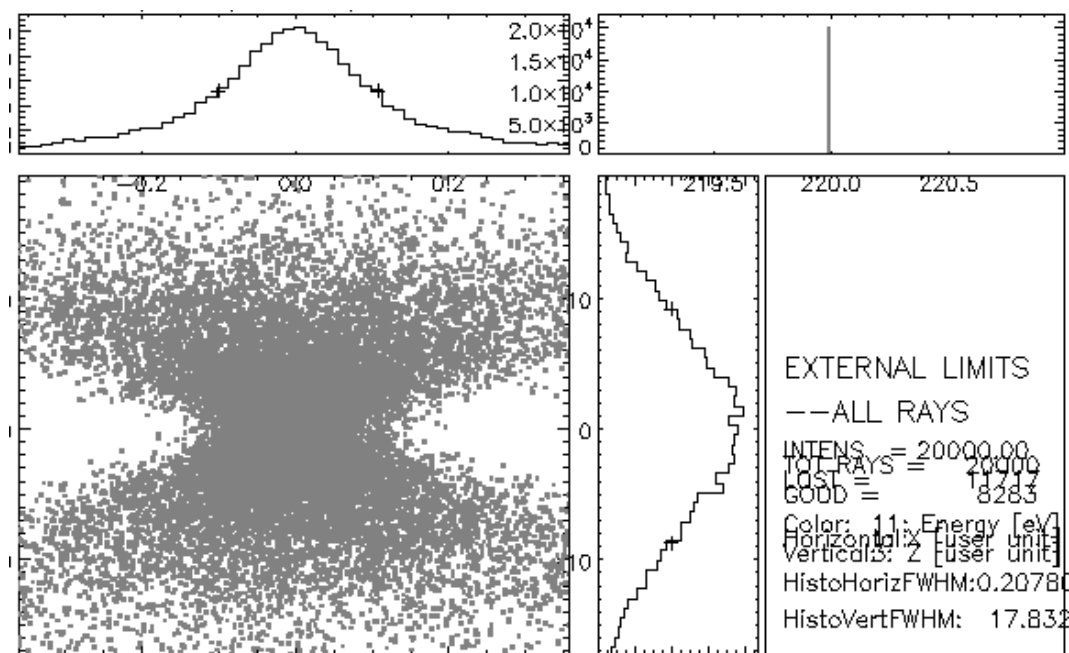


图 19.入射狭缝处光斑大小

由于光学系统不同光子能量的缩放比不同，则相同开口的入射狭缝在不同能量处对应的出射狭缝宽度会不相同。

光栅的面型误差： $\sigma G=0.2''$

平面镜的面形误差： $\sigma M=0.2''$

由于两块光栅的缩放比不同，对于 300l/mm 光栅，入射狭缝宽度设置为  $100\mu\text{m}$ ，对于 1400l/mm 光栅，入射狭缝宽度可以设置为  $150\mu\text{m}$ 。

从下图可以看出入射狭缝开口宽度对光谱分辨率影响最大。可以通过减小入射狭缝的开口尺寸来提高系统的能量分辨本领。

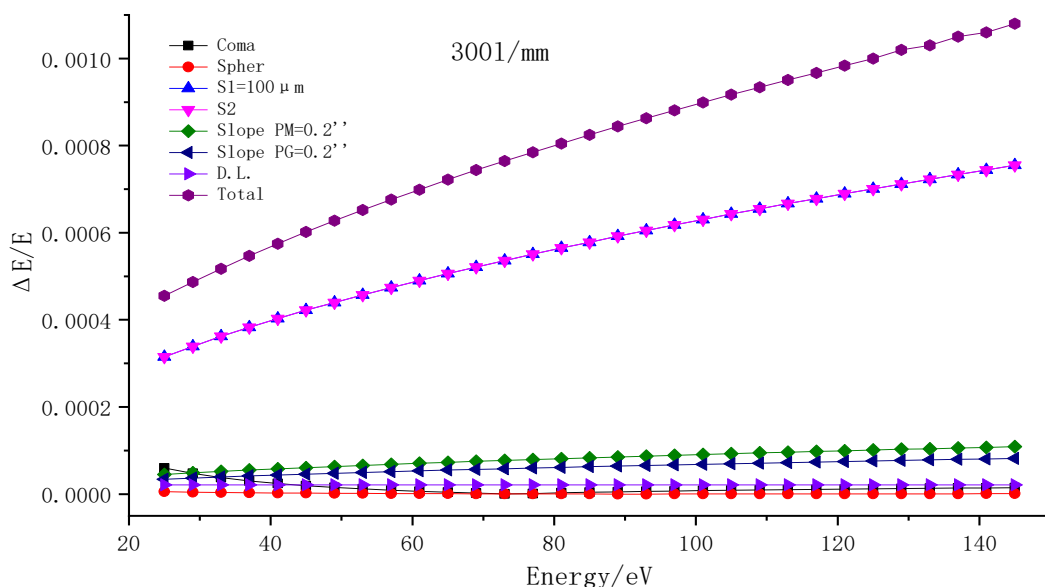


图 20. 300l/mm-各项因素对分辨率的影响



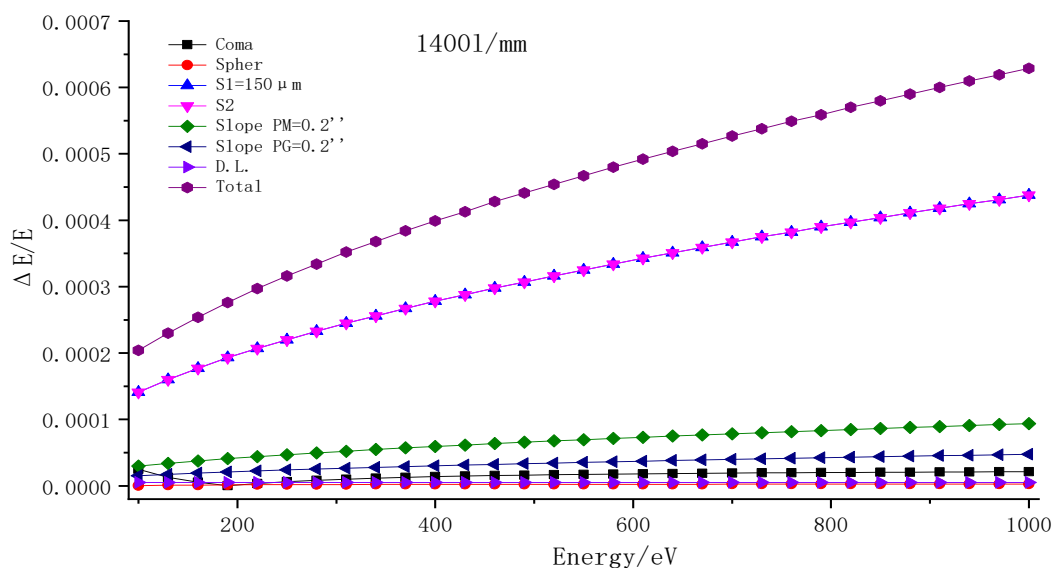


图 21.14001/mm-各种因素对分辨率的影响

下图给出了两块光栅的光谱分辨率，理论上可以到 1000eV，同时由于狭缝处的光斑较大，可以适当的通过增加狭缝开口大小而提高光通量。

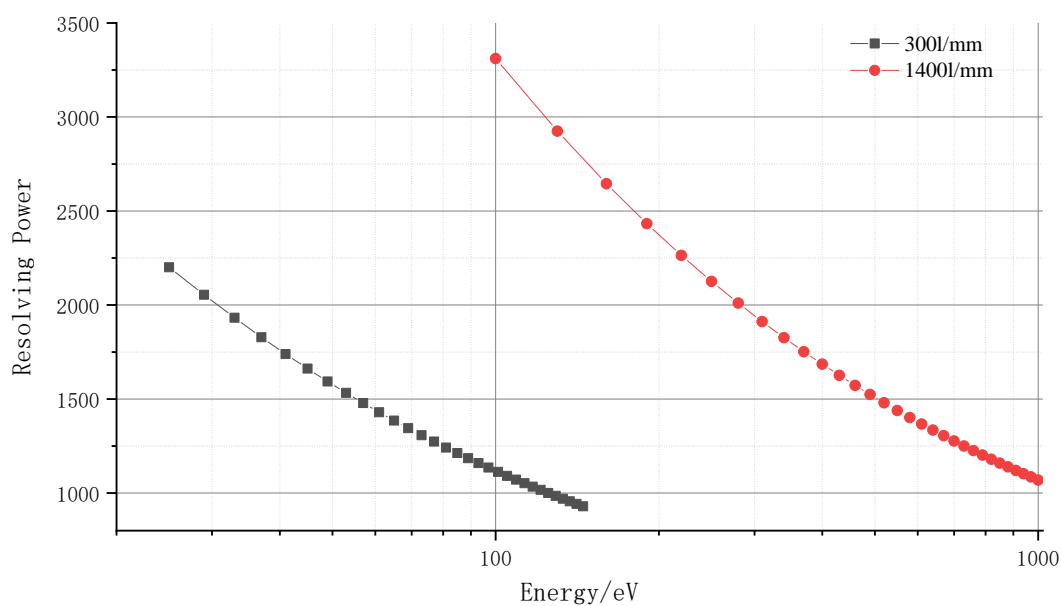


图 22.光栅单色器的分辨本领

通过 SHADOW 软件可以对系统进行光学追迹，如下图所示：

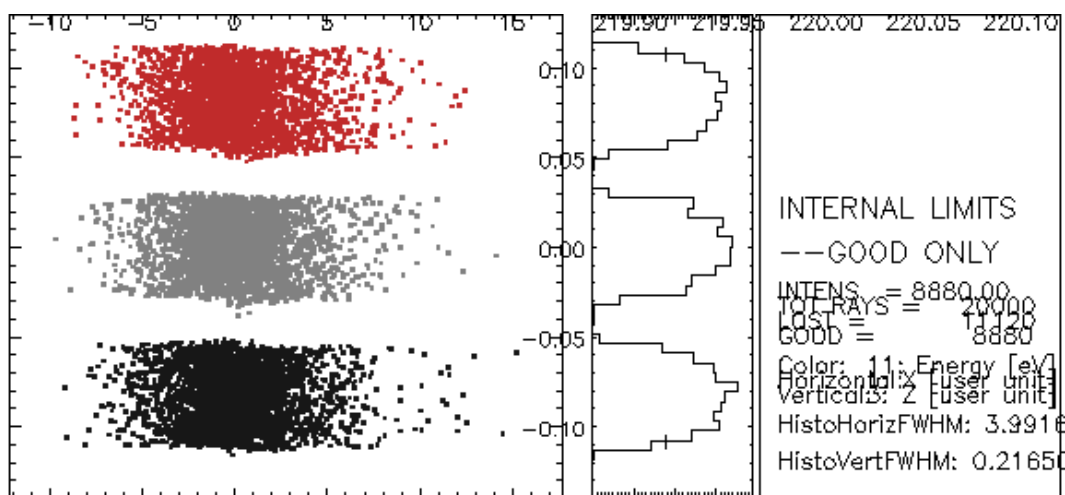


图 23.  $220 \pm 0.1 \text{ eV}$ , Res.P=2200@1400l/mm

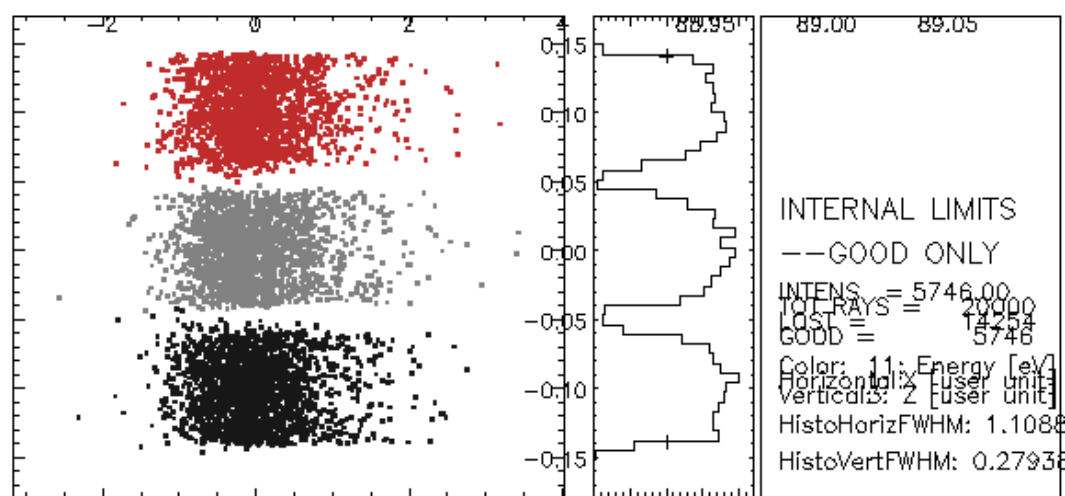


图 24.  $13.5 \pm 0.011 \text{ nm}$ , Res.P=1200@300l/mm

## 5.4.5 光学系统效率

光学系统的效率，主要由前置镜，平面镜，后置镜的反射率，光栅的衍射效率，狭缝的通过率决定，下面给出光学元件的效率、系统的几何效率以及最终的总效率。

### 5.4.5.1 反射镜反射率

前置镜和后置镜的掠入射角为  $3^\circ$ ，镀膜厚度设为  $40 \text{ nm}$ ，反射率由 XOP 软件计算给出，下图给出了使用 Au 镀层在全波段的效率对比，其中对不同偏振态的反射率变化不大，后续计算按照无偏振考虑。

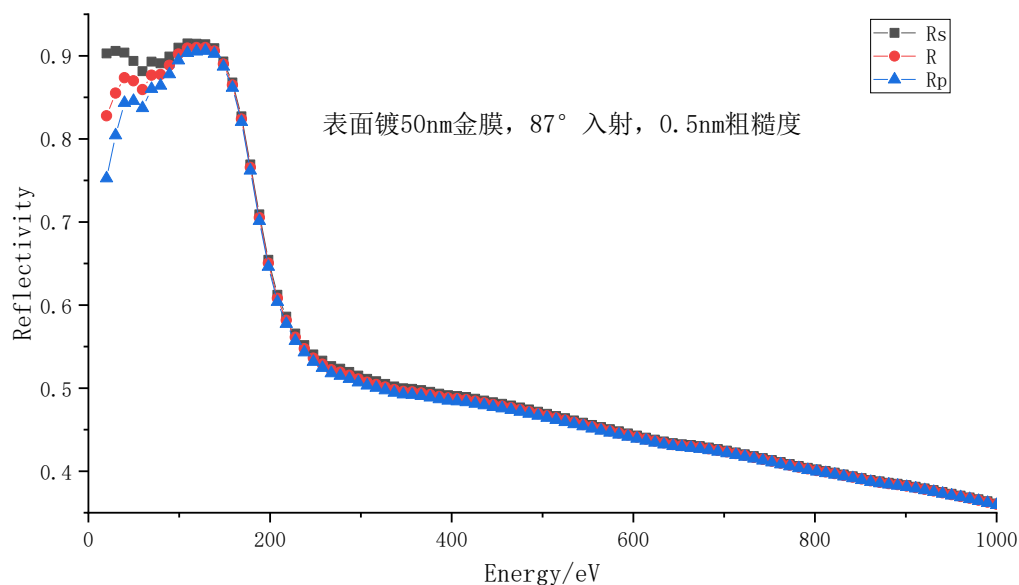


图 25.光学元件反射率（镀层厚度 40nm，表面粗糙度 0.5nm）

#### 5.4.5.2 平面镜反射率

平面镜掠入射角在扫描过程中不断的变化，两块光栅相同能量时平面镜的掠入射角不同，通过 XOP 软件计算平面镜的反射率。

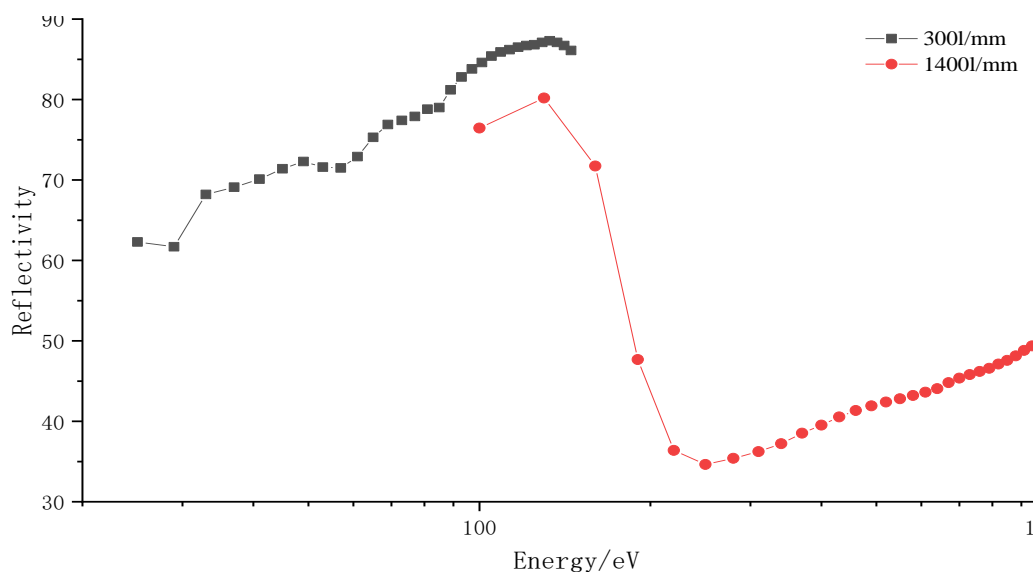


图 26.平面镜反射率

### 5.4.5.3 光栅衍射效率

分别计算闪耀光栅和矩形光栅效率以及不同衍射级次的效率，闪耀光栅效率明显高于矩形槽光栅。但矩形槽光栅高次谐波抑制效果较好，用户希望选择矩形槽光栅。

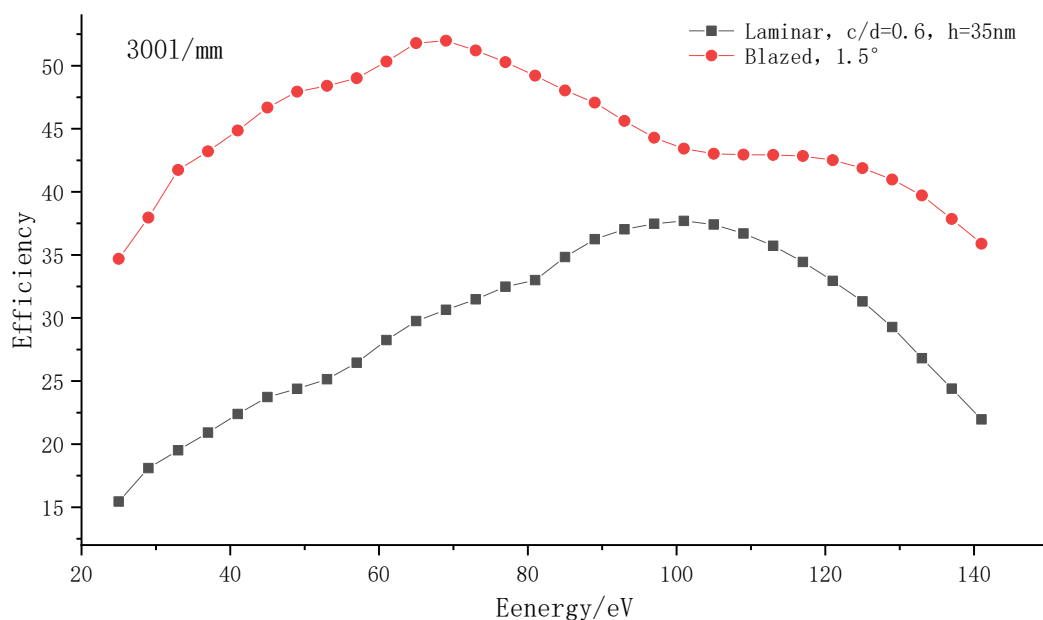


图 27.3001/mm-不同槽型光栅效率

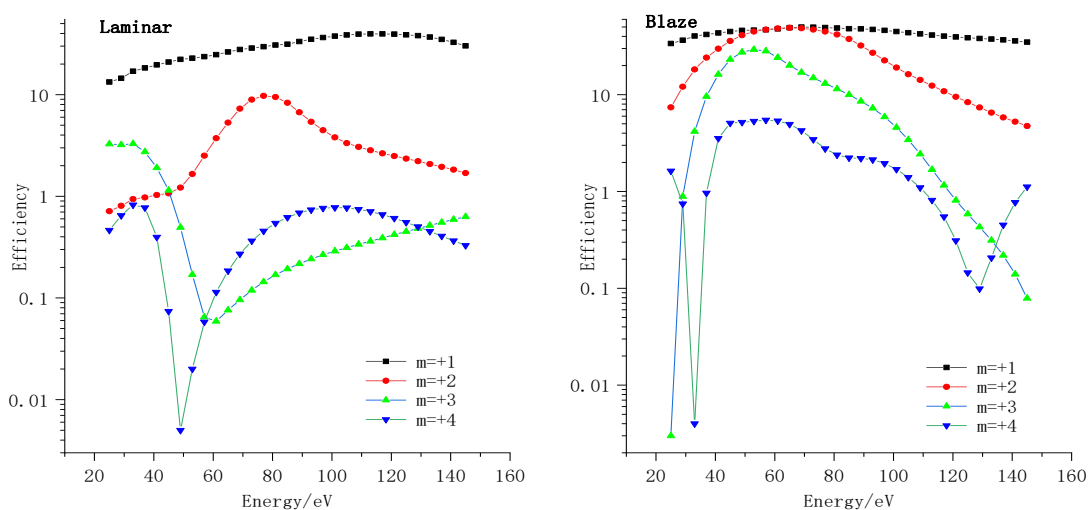


图 28.3001/mm-不同衍射级次效率

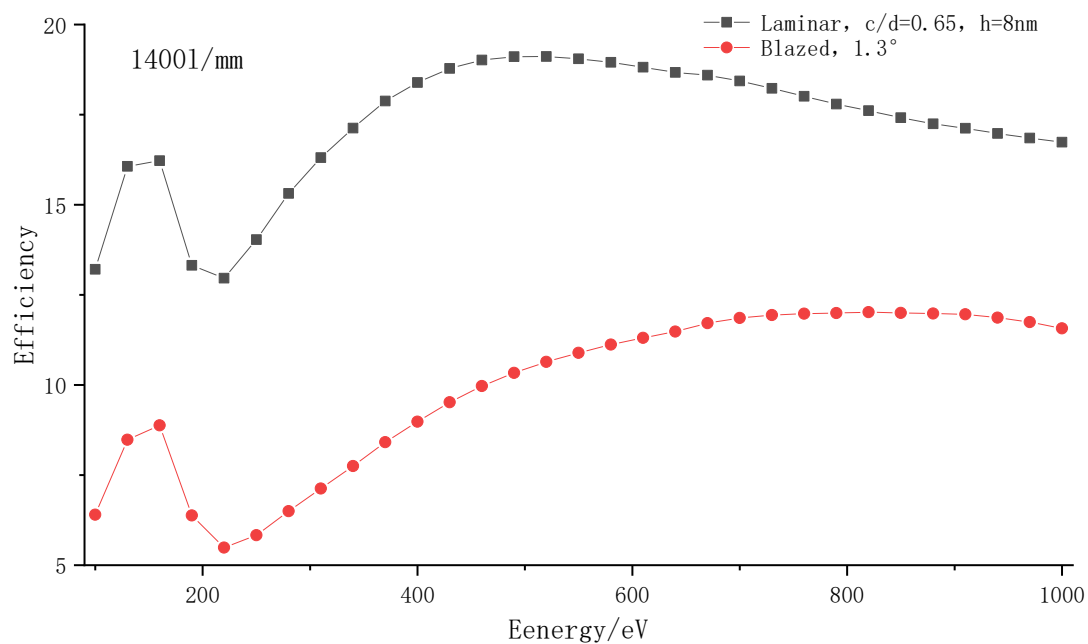


图 29.1400l/mm-不同槽型光栅效率

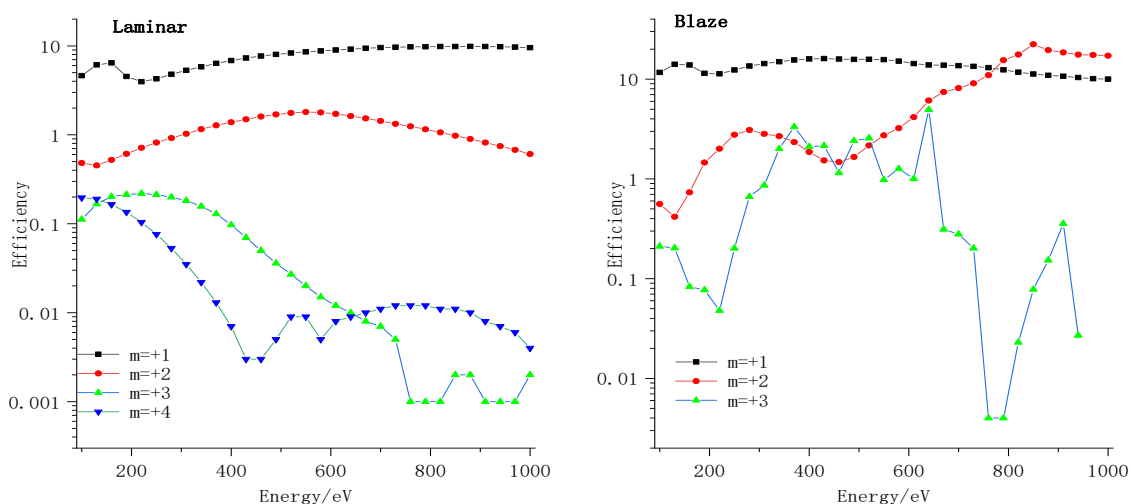


图 30.1400l/mm-不同衍射级次效率

#### 5.4.5.4 几何效率

系统几何效率主要由两部分组成，一部分是尺寸维度，另一维度是角度维度，由于光栅的尺寸有限，而不同能量处光栅的入射角不同，因此会导致垂直接收角发生变化，则对应不同能量情况时的接受效率会有所不同。

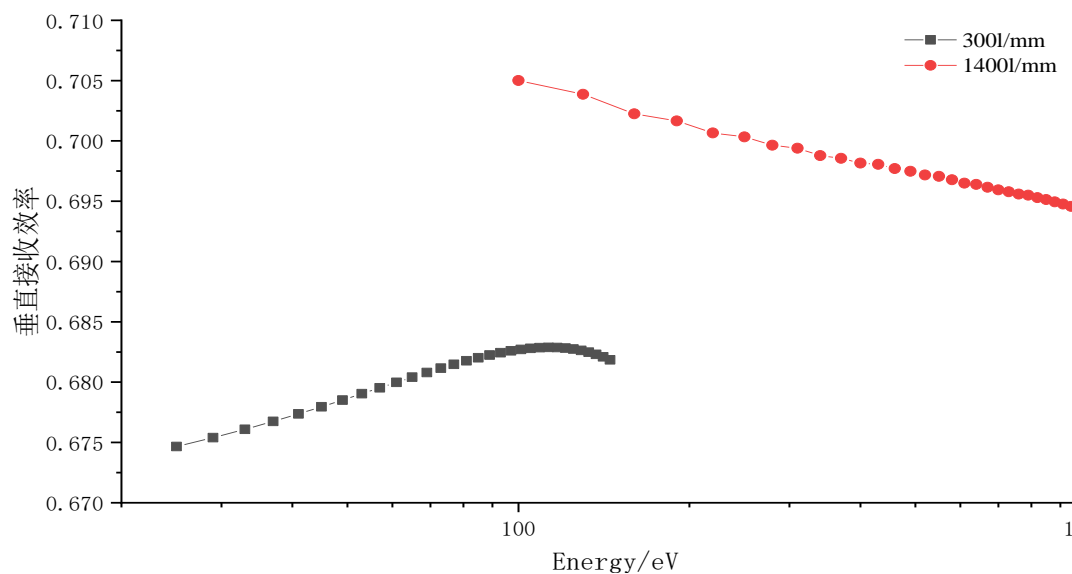


图 31.不同能量下的接收效率

前置镜收光聚焦到入射狭缝，由于像差的存在，导致狭缝光斑偏大，如下图所示。通过追迹模拟的手段分别获得不同狭缝开口大小的情况下，入射狭缝的透光效率。

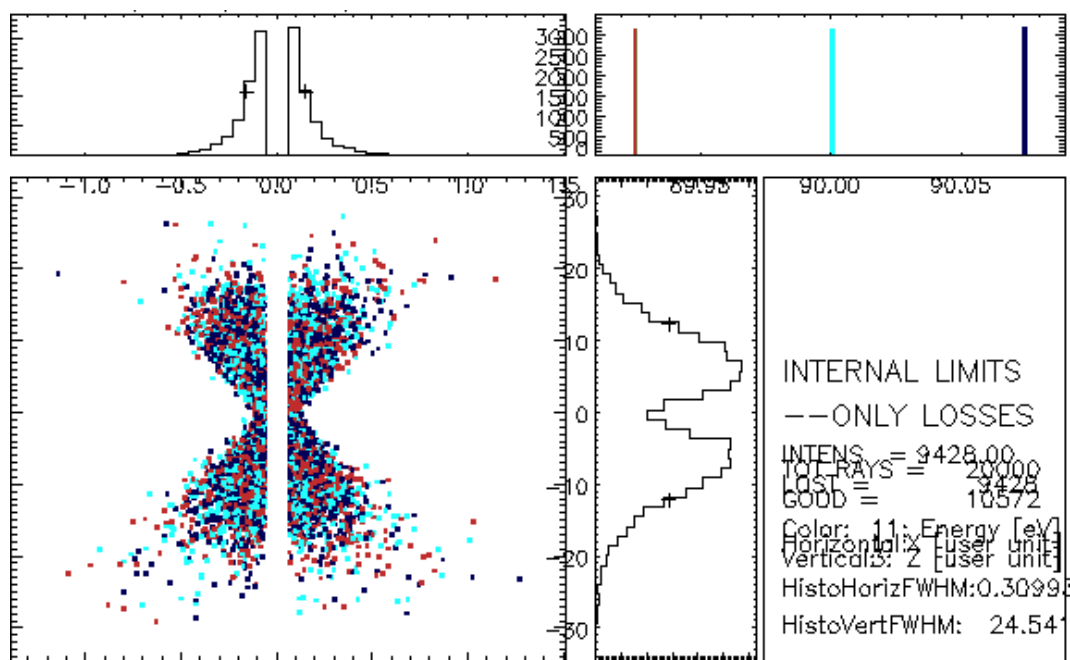


图 32.入射狭缝处光斑

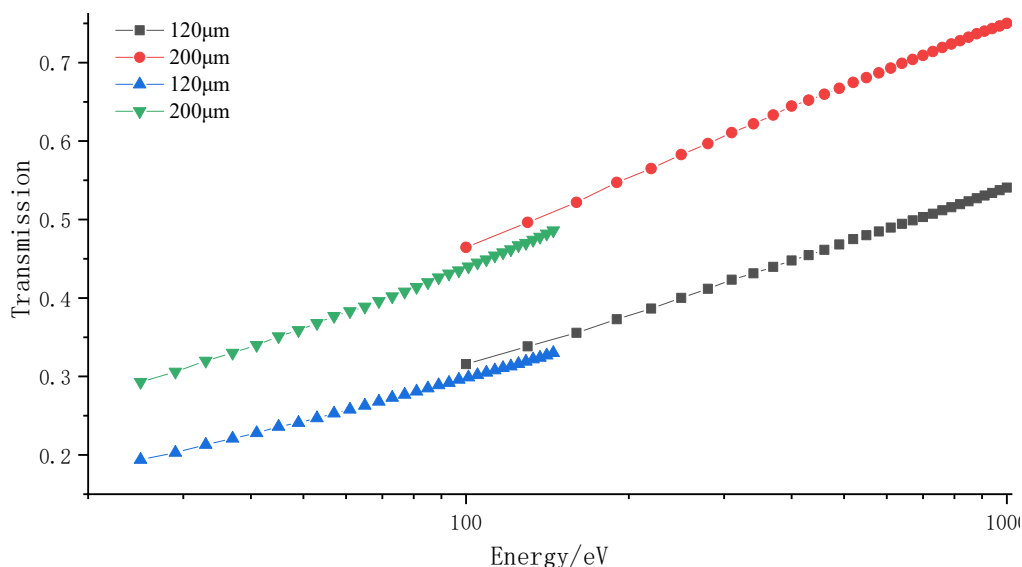


图 33.入射狭缝透过率

#### 5.4.5.5 系统总效率及光通量

将各光学元件的效率和几何效率相乘得到光束线总效率，下图给出的是各个能量点的传输效率，在低能段较高，但是在高能段，由于光学元件反射率低，同时几何传输效率也低，导致传输效率很低，可以适当的根据需求来调节入射狭缝的尺寸大小。

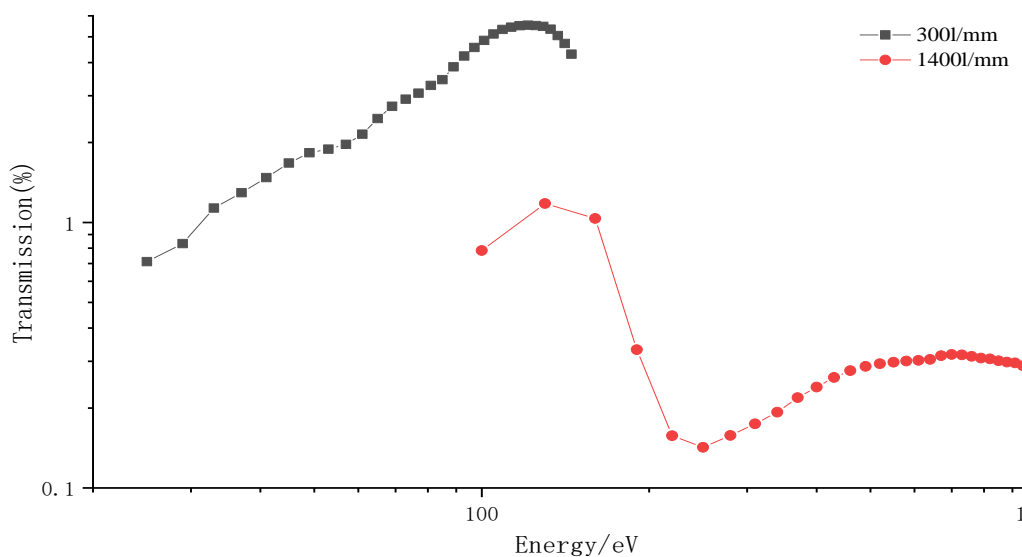


图 34.系统传输效率

将总效率与光源光子通量相乘，同时考虑各个能量点的分辨率，得到系统的光通量，对于 300l/mm 光栅，理论上最高通量接近  $10^{12}$  phs/s@120eV @300mA，对于 1400l/mm 光栅，理论上最高通量为  $2 \times 10^{11}$  phs/s@130eV @300mA 左右。设计需求值是  $8 \times 10^{10}$  phs/s@ 120 eV， $3 \times 10^9$  @ 200 eV，各有 1 个量子左右的余量。

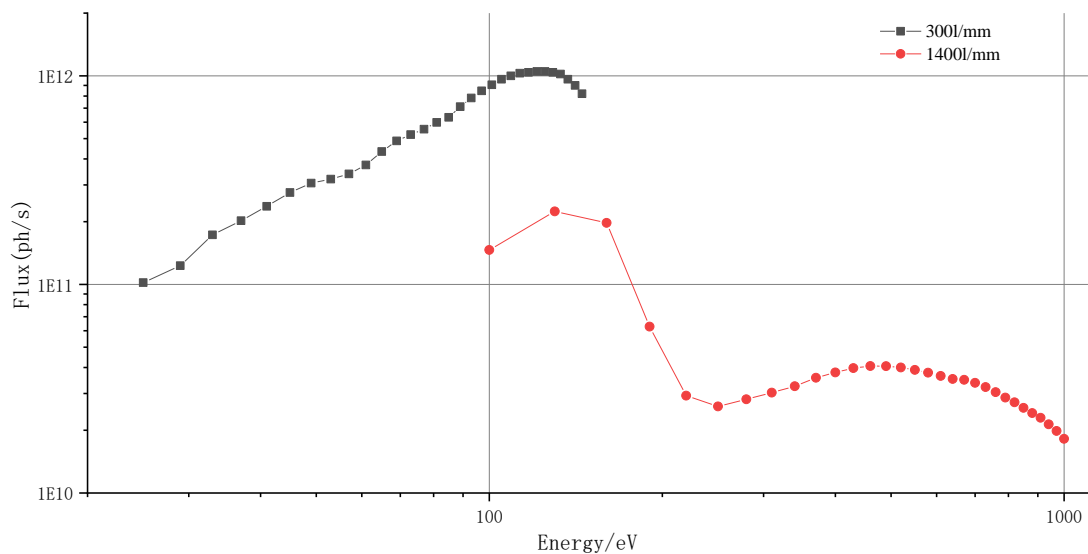


图 35.光束线的输出光通量

#### 5.4.6 离轴转动参数

变包含角光栅单色器一般采用平面镜离轴转动来改变包含角。

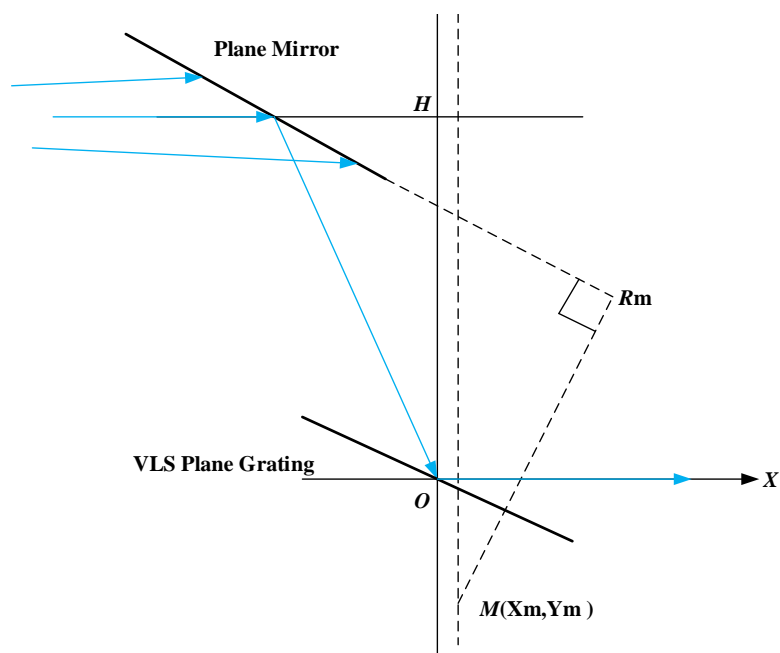


图 36.离轴转动模型

见图 36，建立以平面光栅中心为坐标原点  $O$ ，出射光为  $x$  轴，垂直方向为  $y$  轴的坐标系。为了保证平面镜(PM)反射光轴经过  $O$  点，PM 需离轴转动，设转动中心为  $M(X_M, Y_M)$ ，转动中心与平面镜垂直距离为  $R_M$ ，也就是离轴转动半径。最终得到离轴转动参数为：

$$Y_H=31\text{mm}, X_M=0\text{mm}, R_M=31.1\text{mm}, Y_M=-15.6\text{mm}$$



下图给出了各个能量点中心光线偏离光栅中心尺寸  $W_g$ ，基本可以控制在  $20\mu\text{m}$  以内，对系统性能影响较小，可以忽略。

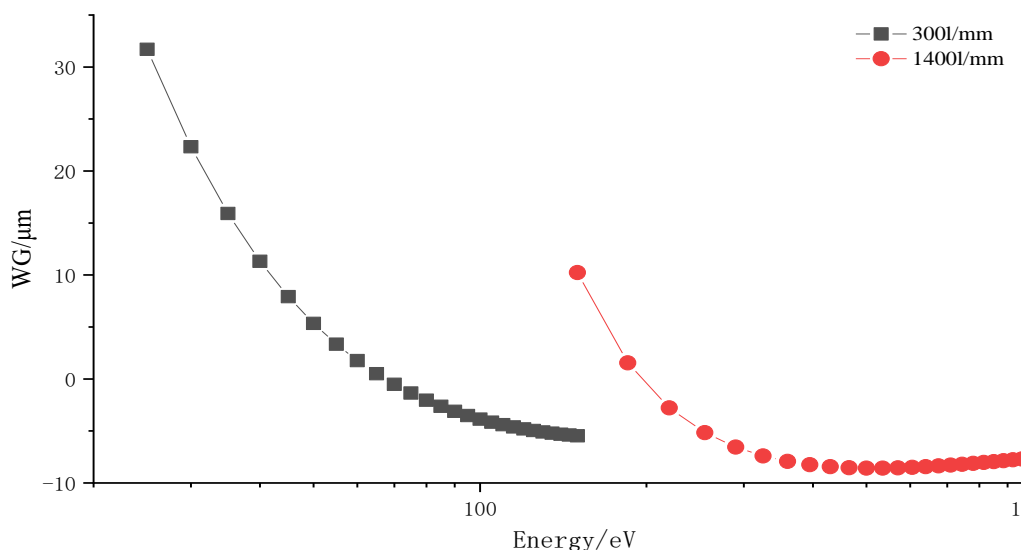


图 37.光斑偏离中心量

下图出了各个能量点在平面镜上的光斑尺寸，由于光栅尺寸固定，光栅充当了光阑的作用，假定光栅有用长度为  $180\text{mm}$ ，则对与  $1400\text{l/mm}$  光栅对应的平面镜上的光斑尺寸约为  $92\text{mm}$ 。对与  $300\text{l/mm}$  光栅对应的平面镜上的光斑尺寸约为  $136\text{mm}$ 。

计算得到平面镜有效长度  $391.7\text{mm}$ ，实际平面镜长度为  $400\text{mm}$ ，由于平面镜端面距离光栅中心较近，工程设计时需要重点考虑防碰撞的设计。

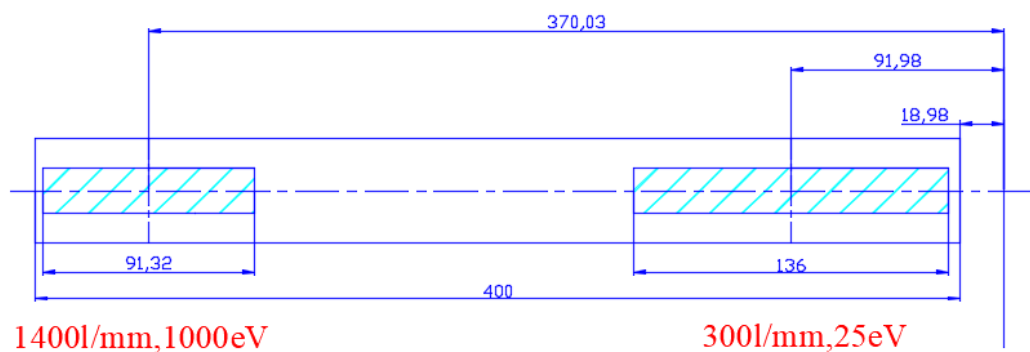


图 38.平面镜安装尺寸示意图

## 5.4.7 光斑大小

追迹模拟不同位置的光斑大小，确认光学元件参数。

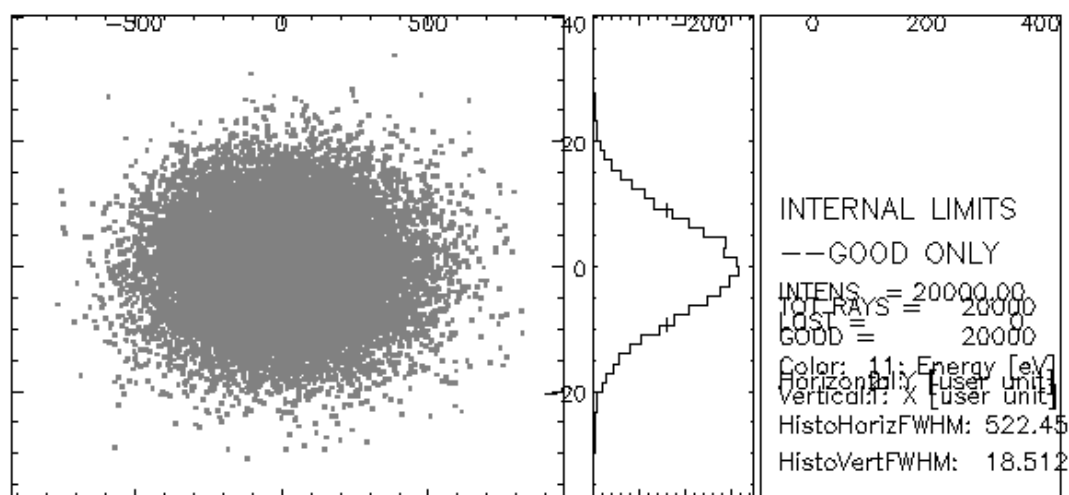


图 39.前置镜 522×18.5mm<sup>2</sup>

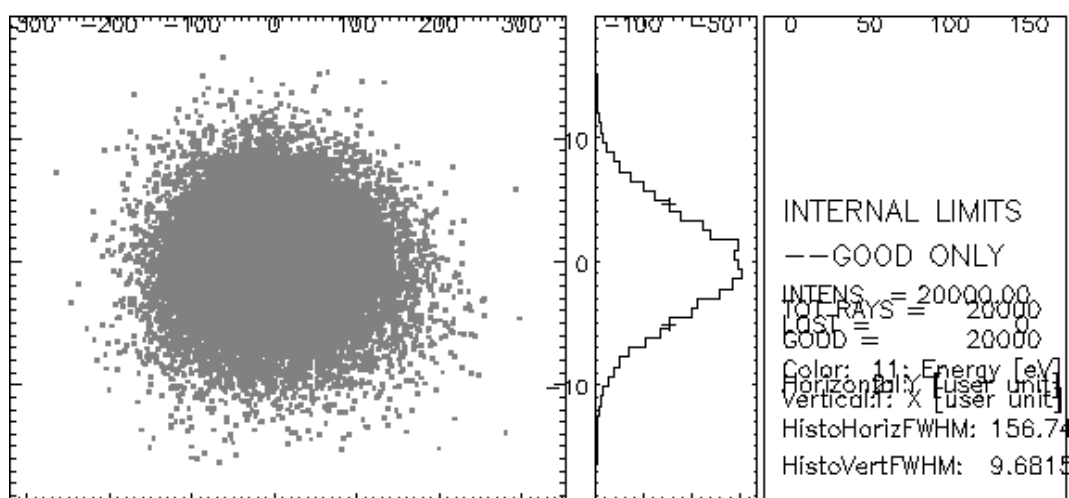


图 40.光栅 156×10mm<sup>2</sup>

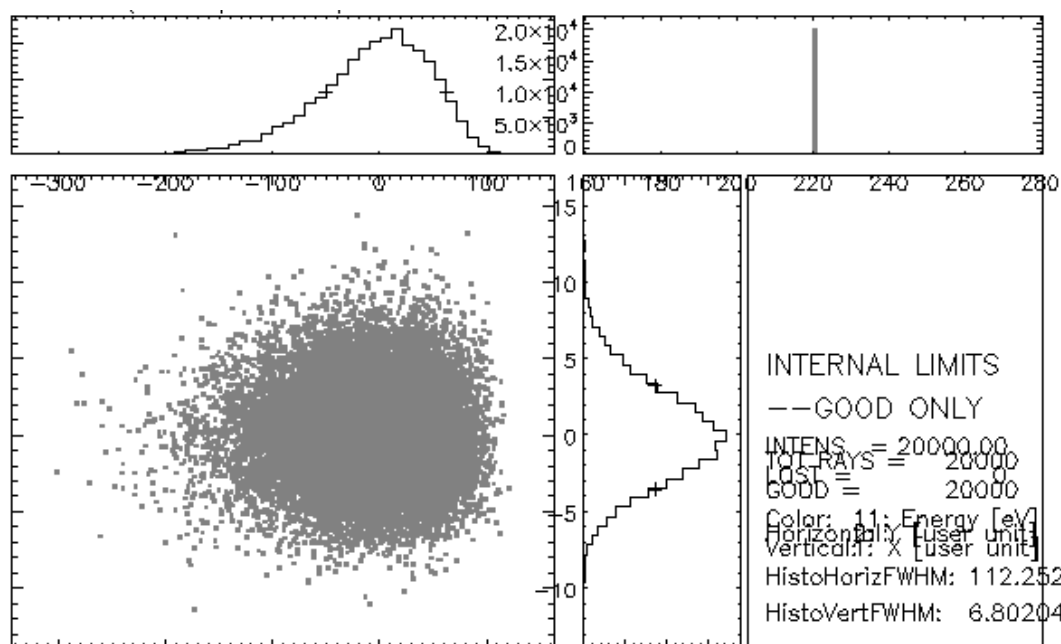


图 41.后置镜 112×6.8mm<sup>2</sup>

下图给样品点处的光斑大小追迹情况模拟，从图中可以看出，聚焦光斑尺寸约为  $0.18 \times 1.25 \text{ mm}^2$ ，满足用户指标要求。

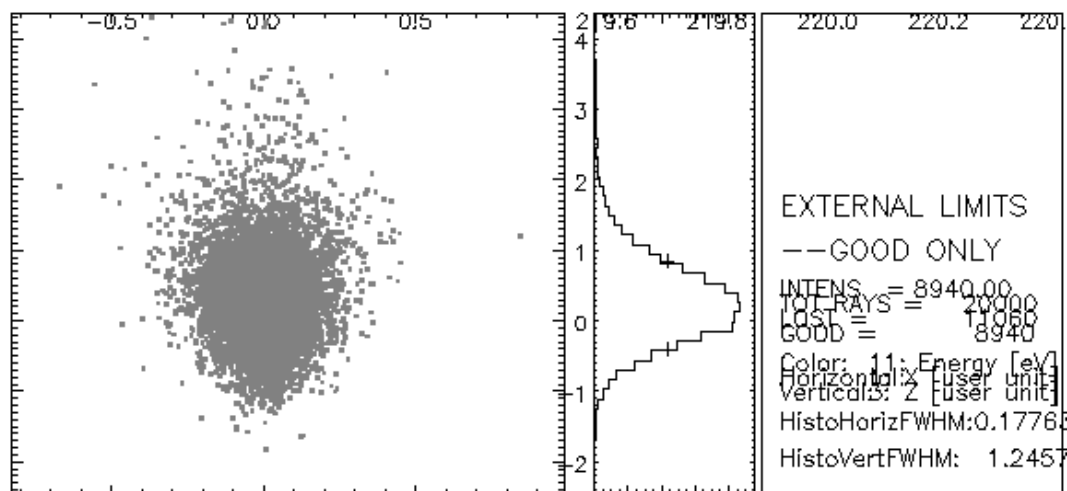


图 42.实验站光斑( $\text{FWHM}: 0.18 \times 1.25 \text{ mm}^2$ )

谱学线站距离计量线站的距离为 1.4 米，后续的发散角为  $2.0 \times 2.0 \text{ mrad}^2$ ，如下图所示：

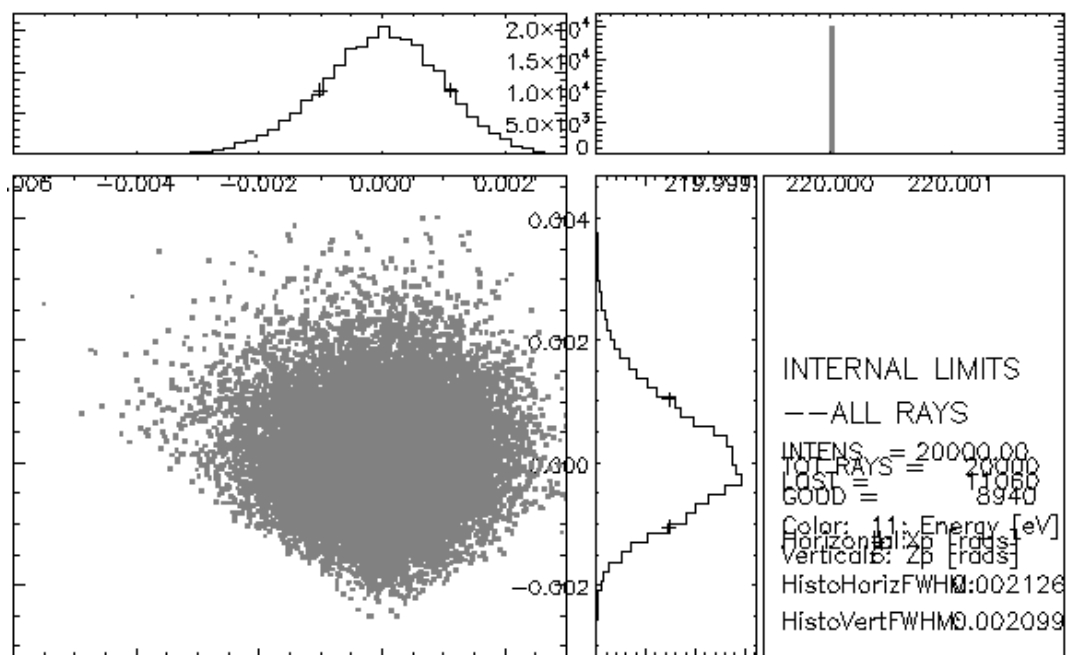


图 43.实验站处光斑大小  $2.0 \times 2.0 \text{ mrad}^2$

则相应的实验站光斑如下图所示，光斑接近  $1.52 \times 1.88 \text{ mm}^2$

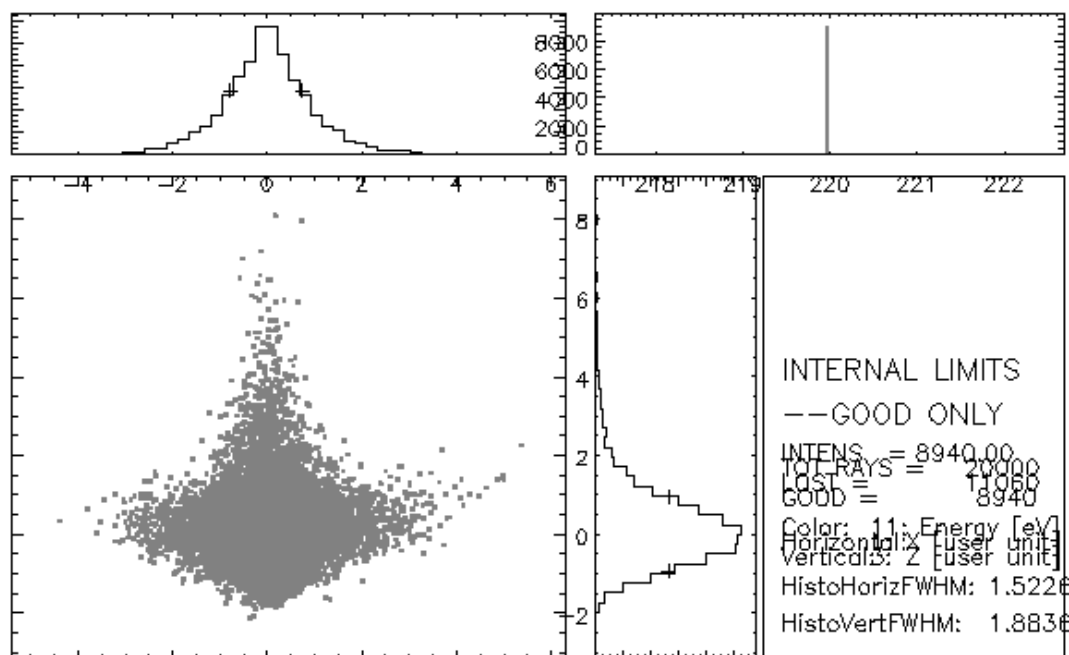


图 44.谱学实验站处的光斑大小

## 5.4.8 光学元件

表 9.光学元件参数表

	前置聚焦镜 M1	后置聚焦镜 M2	平面镜	300 l/mm 光栅	1400l/mm 光栅
面型	超环面	柱面镜	平面	平面	平面
元件尺寸(l×w×h) 有效尺寸(l×w)	550×50×50 530×30	150×40×30 140×20	400×50×50 380×40	185× 40 × 25 175×30	185× 40 × 25 175×30
面型参数(mm)	R = 155280 ρ= 184.72	ρ= 89.7	/	/	/
线密度				$n_0=300$ l/mm $a_1 = -1.426 \times 10^{-3}$ mm <sup>-1</sup> $a_2 = 2.712 \times 10^{-7}$ mm <sup>-2</sup>	$n_0=1400$ l/mm $a_1 = -8.245 \times 10^{-4}$ mm <sup>-1</sup> $a_2 = 3.0020 \times 10^{-7}$ mm <sup>-2</sup>
光 栅 类 型 (blaze/laminar)				Laminar	Laminar
闪耀角				c/d=0.6, h=35nm	c/d=0.65, h=8nm
弧矢/子午面型误差 (arcsec RMS)	1"/0.2"	1"/0.2"	1"/0.2"	0.2"	0.2"
镀膜	Au	Au	Au	Au	Au
覆盖能量范围	25~1000 eV	25~ 1000 eV	25~1000 eV	25~150 eV	100~1000eV
入射角	87°	87°	80°-90°	82.455°-86.944°	86.071°-88.78°