

HEPS 工程工作笔记

HEPS Technical Note

标题 (Title)	B8 束线设计 – 第三版光学设计计算		
作者 (Author)/ 系统 (System)	杨福桂	日期 (Date)	2020-2-16
编号 (Serial No.)		页数 (Pages)	共 页 (含附件)
<div>摘要 (abstract):</div> <p>根据 2.13-2.16 的讨论沟通，相比于 2019 年 2 月份的方案，B8 束线设计的调整思路：低能段使用四镜谐波抑制镜，这样可以减少工程造价，提高高能段光束品质（此时无谐波镜）。微米聚焦方案中，将 KB 镜后移，虽然影响了光通量，但是可以保证样品点的重合。在此思路下开展以下评估：</p> <div><div>(1) 谐波抑制的计算，评估有无谐波镜，影响能段及效果；</div><div>(2) 束线性能的计算，评估微米聚焦和亚微米聚焦两个模式的性能。</div></div> <div>结论：</div>			
会 签 Concurred by			
有效性 Validation	填表人 Prepared by	审 核 Reviewed by	批 准 Approved by
签 名 Signature	XX		
日期 Date	XX（一定写上日期）		

1 束线光学设计综述

1.1 系统接收角

在讨论束线布局前，首先根据光源特征选定系统接收角。表格 1-1 给出了 10keV 下各接收角度对应的通量。可见，束线接收角为 $18\mu\text{rad}\times 18\mu\text{rad}$ 接收的通量占总通量的 90%，且角度变大增益变小。因此单色光的最大接收角设置为 $18\mu\text{rad}\times 18\mu\text{rad}$ 。

表格 1-1 插入件不同 K 值下各接收角对应的光通量

接收角度 $\mu\text{rad}\times\mu\text{rad}$	接收光通量 $\text{ph/s}/0.1\%\text{BW}$ @ 10keV
30×30	$7.5\text{e}14$
25×25	$7.4\text{e}14$
20×20	$7.0\text{e}14$
18×18	$6.8\text{e}14$
16×16	$6.2\text{e}14$
14×14	$5.4\text{e}14$

对于白光镜，考虑到边缘效应，系统的接收角为 $25\mu\text{rad}\times 25\mu\text{rad}$ 。在此基础上，我们确定各反射镜的长度。

1.2 反射镜反射率

为了满足束线能区范围 4.8keV - 45keV 及能扫的要求，且保证能量变化时，反射镜（不包括谐波抑制镜）的掠入射角不变。从图可以看到，Pt@1.7mrad 和 Si@1.7mrad 的组合是合适的，即反射镜以 Si 为基底，部分镀 Pt，以 1.7mrad 入射。

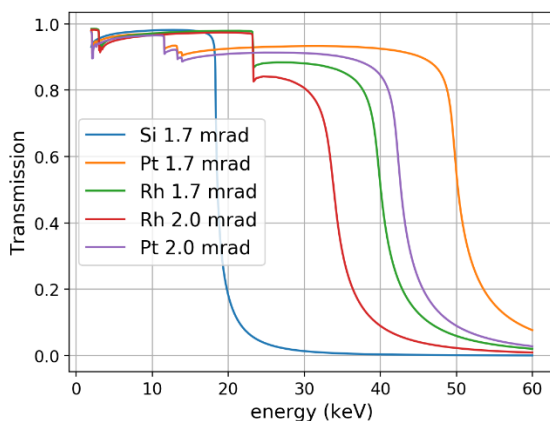


图 1-1 Si、Pt、Rh 反射率曲线

在能量低于 17keV 时，使用 Si 作为反射面；能量在 17-45keV 时，使用 Pt 作为反射面。据此反射率曲线 Si@1.7mrad，可以看到 7keV 以下的能量段存在谐波问题。为此，可通过单色器失谐或者添加谐波抑制镜解决。在使用大光斑进行实验时，可以使用失谐；谐波抑制镜位于紧贴 SSA，减少面型误差对二次光源光斑尺寸的影响。为了确定谐波镜镀层，图 1-2 给出了 Si、Rh、Ni 和 Pt 在不同掠入射角下的反射率曲线。可以看到 Pt@8mrad 或者 Rh@7mrad 即可保证反射率，又可保证 4.8-7keV 的谐波抑制比。

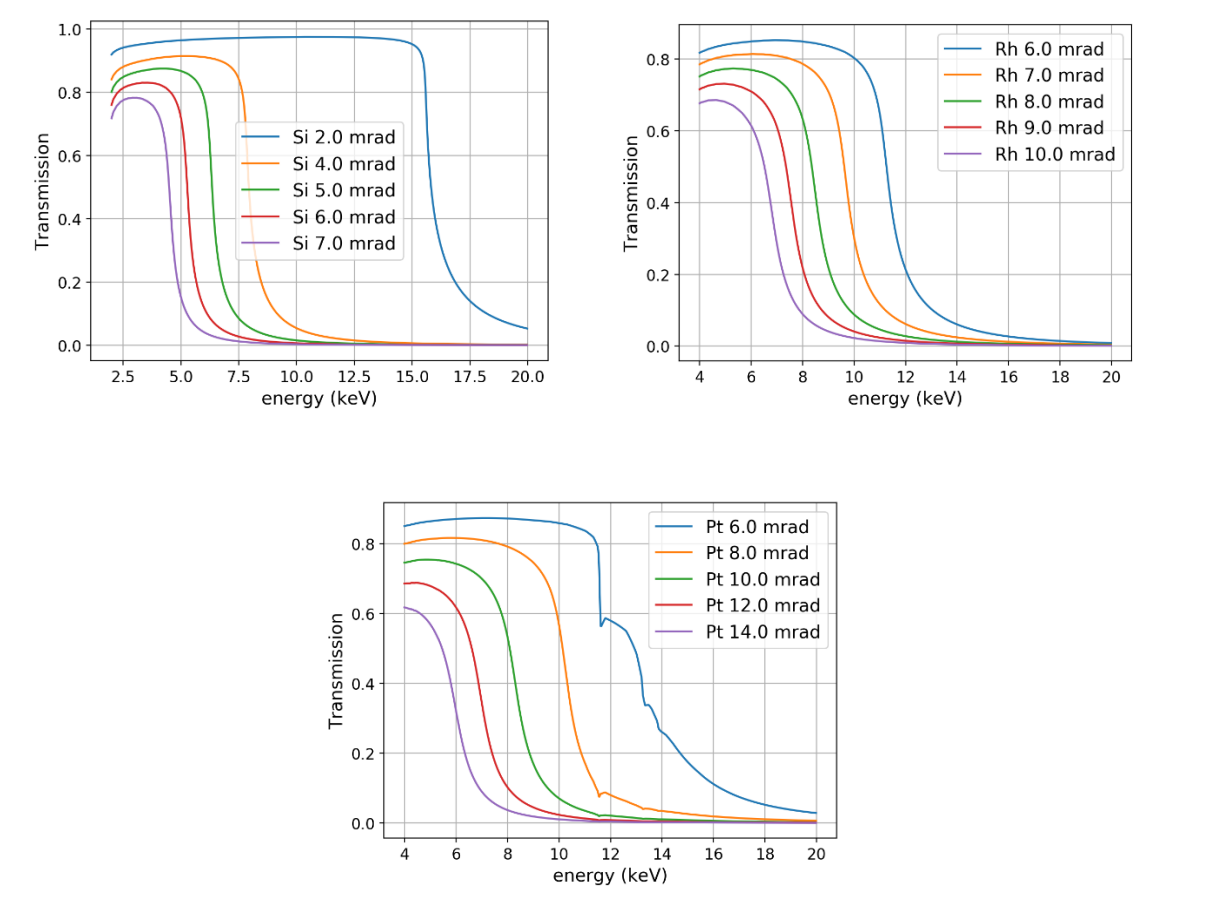


图 1-2 不同材料镀层的反射率

1.3 束线设计考虑

1.3.1 束线设计的整体考虑

表格 1-2 B8 束线光学设计考虑因素

输入因素	问题点	设计方案对策	输出
------	-----	--------	----

能量范围 4.8keV - 45keV	高能反射	系统掠入射角	Pt, 1.7mrad
	低能反射	镀层类型	Si、Pt
	?		
能量扫描 (至 1keV)	能扫出高变化	单色器前准直	准直反射镜
	变能量点 CCM 出高变化	Channel-cut 晶体设计	分段式 CC
		谐波镜的补偿	四镜、双镜方案
	能扫热变形	布局	亚微米次级聚焦方案
谐波抑制比 0.001	低能谐波比不足	微米快扫下谐波抑制反射镜	四镜、双镜方案
		亚微米模式下单色器失谐	DCM 方案
聚焦性能 尺寸: 300nm 距离: 150mm	微米聚焦与亚微米聚焦的配合	亚微米: DCM VFM、sub-micron-KB	器件数量与类型
		微米: VCM、CCM、VFM、HRMs、micron-KB	
		聚焦方案	次级聚焦方案
造价			
工程风险			
使用性能			

1.3.2 聚焦性能优化考虑

利用相空间理论研究束线布局的优化。这里主要考虑反射镜的接收口径及工作距离因素。很容易得到样品处的相空间尺寸为：

$$PS'_{H,V} = \frac{l_{H,V}\theta}{q_{H,V}} s'_{H,V}$$

其中， l_H 是发射镜的长度， θ 是反射镜掠入射角， $q_{H,V}$ 是像距， $s'_{H,V}$ 是成像聚焦光斑尺寸。

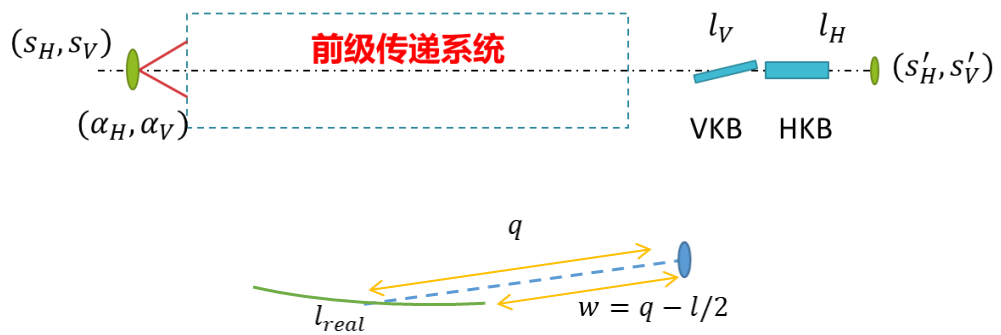


图 1-3 光学传输系统的一般模型

首先考虑最大接收效率的问题，如果整个光学传输系统没有误差，则整个系统的传

输过程中，相空间尺寸守恒，根据 IHEP-HEPS-OS-EN-2020-001 文档中关于相空间计算的方法，可以获得系统最大传输效率：

$$EF = \frac{PS'_{H,V}}{PS_{H,V}} = \frac{PS'_{H,V}}{\alpha_{H,V} s_{H,V}}$$

其中， $q_H = l_H/2 + W$ ， W 是工作距离。

当光学传输系统的器件存在误差时，为了减小分析的复杂度，可以等效到虚拟光源尺寸。例如，反射镜的位置为 37m，面形误差为 0.3 μrad ，则光源的展宽为 $2*2.35*37*0.3 = 52 \mu\text{m}$ 。

(1) 对于 B8 束线来说，亚微米聚焦下，假设反射镜长度最大为 300mm，样品点尺寸 $0.30 \mu\text{m} \times 0.30 \mu\text{m}$ ，工作距离 150mm，由此可以计算垂直和水平总的相空间尺寸为：
 $1.7\text{mrad} * 300\text{mm} * 1.7\text{mrad} * 300\text{mm} * 0.30\mu\text{m} * 0.30\mu\text{m} / (300\text{mm} * 600\text{mm}) = 0.13\mu\text{m}^2 \cdot \text{mrad}^2$ ，样品处的光斑尺寸为 $44 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ ，如果接收角 $18 \mu\text{rad} \times 18 \mu\text{rad}$ ，对应的相空间尺寸为 $0.25\mu\text{m}^2 \cdot \text{mrad}^2$ ，也就是说最大效率为 0.52，当按照 200nm 光斑设计是，效率为 0.23。也就是说，**聚焦光斑尺寸的设计值，极大决定了系统效率。**

(2) 对于 B8 束线来说，微米聚焦模式下，与其他束线一样，面形误差是系统性能的重要贡献者，扩展了系统的相空间尺寸。当反射镜的长度为 600mm，掠入射角 1.7mrad，工作距离为 1.5m，样品点的 $1.7\text{mrad} * 0.6\text{m} * 1.7\text{mrad} * 0.6\text{m} * 2\mu\text{m} * 2\mu\text{m} / (1.5\text{m} * 1.8\text{m}) = 1.54\mu\text{m}^2 \cdot \text{mrad}^2$ ，**远大于光源的相空间尺寸，说明微米聚焦模式的效率是没有问题的。**

(3) 综合以上两点来看，微米聚焦和亚微米聚焦两个模式，为了优化通量，亚微米聚焦应优先考虑。需要注意这里仅仅考虑了聚焦成像效果，从器件类型及大致布局又受限于快扫微米聚焦模式。

另外一方面，根据以上，虚拟光源的尺寸 $s_{H,V}$ 确定的情况下，也可以确定光源处的最大接收角度：

$$\alpha_{H,V} = \frac{l_{H,V} \theta}{q_{H,V}} \frac{s'_{H,V}}{s_{H,V}} = \frac{l_{H,V} \theta}{M_{H,V} q_{H,V}}$$

$M_{H,V}$ 是整个系统的缩放比。例如，对于亚微米聚焦，如果考虑仅有两个垂直反射镜的相空间扩展至 $52 \mu\text{m} * 1.414 = 73 \mu\text{m}$ ，那么，系统最大接收角为 $0.13/73/42 = 42 \mu\text{rad}^2$ 。目前亚微米聚焦模式采用 $8.3 \mu\text{rad} * 5.6 \mu\text{rad} = 46 \mu\text{rad}^2$ 。即当前的设计，相空间已达到理论极限。

1.4 束线布局配置

束线布局如图 1-4 所示，水平方向采用直接聚焦方式，垂直方向采用二级聚焦方式。

首先，确定系统的接收角度，亚微米模式的接收角为 $0.3 \times 1.7/61 = 8.3 \mu\text{rad}$ （水平）， $0.3 \times 1.7/11 \times 4.5/37 = 5.6 \mu\text{rad}$ （垂直）。如表格 1-1 所示， $18 \mu\text{rad} \times 18 \mu\text{rad}$ 基本接收了大部分的通量，考虑到相空间的尺寸不是问题，因此设定微米聚焦模式的接收角为 $18 \mu\text{rad} \times 18 \mu\text{rad}$ 。

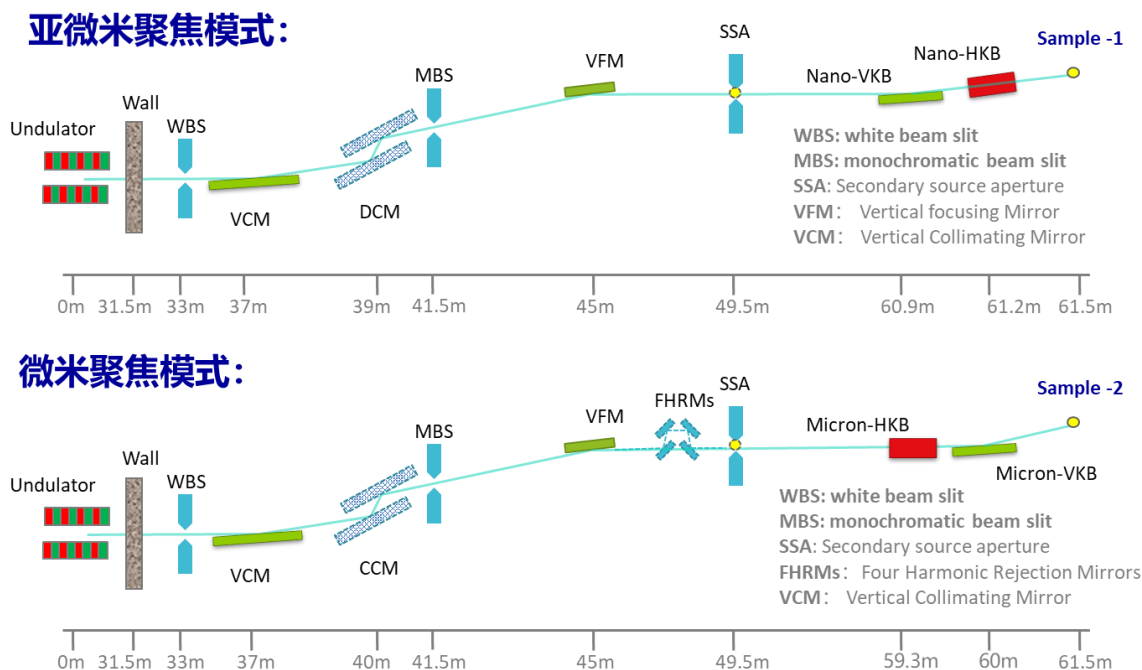


图 1-4 仿真布局图

2 亚微米聚焦方案性能

对于亚微米聚焦，水平方向采用直接聚焦的方案，这样主要由缩放比来决定水平聚焦的光学布局。根据光源尺寸 $42 \mu\text{m}$ ，保证一定冗余下，设计样品点尺寸为 200nm ，由此可以计算水平缩放比 M 要达到 210（。

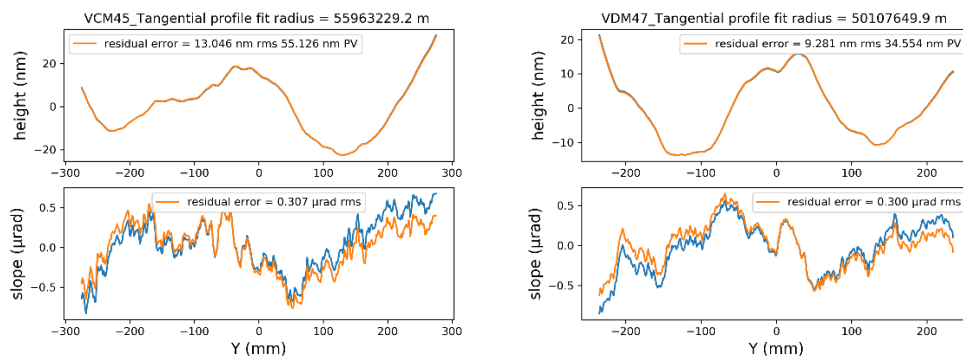


图 2-1 反射镜面形误差 VCM 和 VDM 反射镜的面形误差曲线，在全口径内的斜率误差为 $0.3 \mu\text{rad rms}$

追迹亚微米模式，次级光源点处的光斑分布。

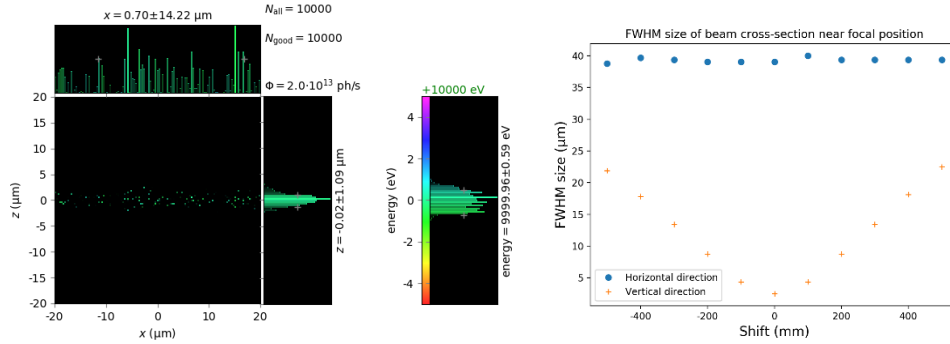


图 2-2 无误差时的二次光源处的追迹结果

加载面形误差后，在 49.5m 处和偏离 49.9m 处的光斑尺寸，即离焦 0.4m。在实际操作中，该误差通过调节 VCM 的压弯量补偿，为了简化问题，这里调节 VFM 的焦距至 4.2m，将最小光斑焦点移动到 49.5m 附近，见图(d)。但是我们要认识到在能扫过程中面形误差的会发生变化，进而导致这种最佳焦点位置的移动，因此应避免这类问题。

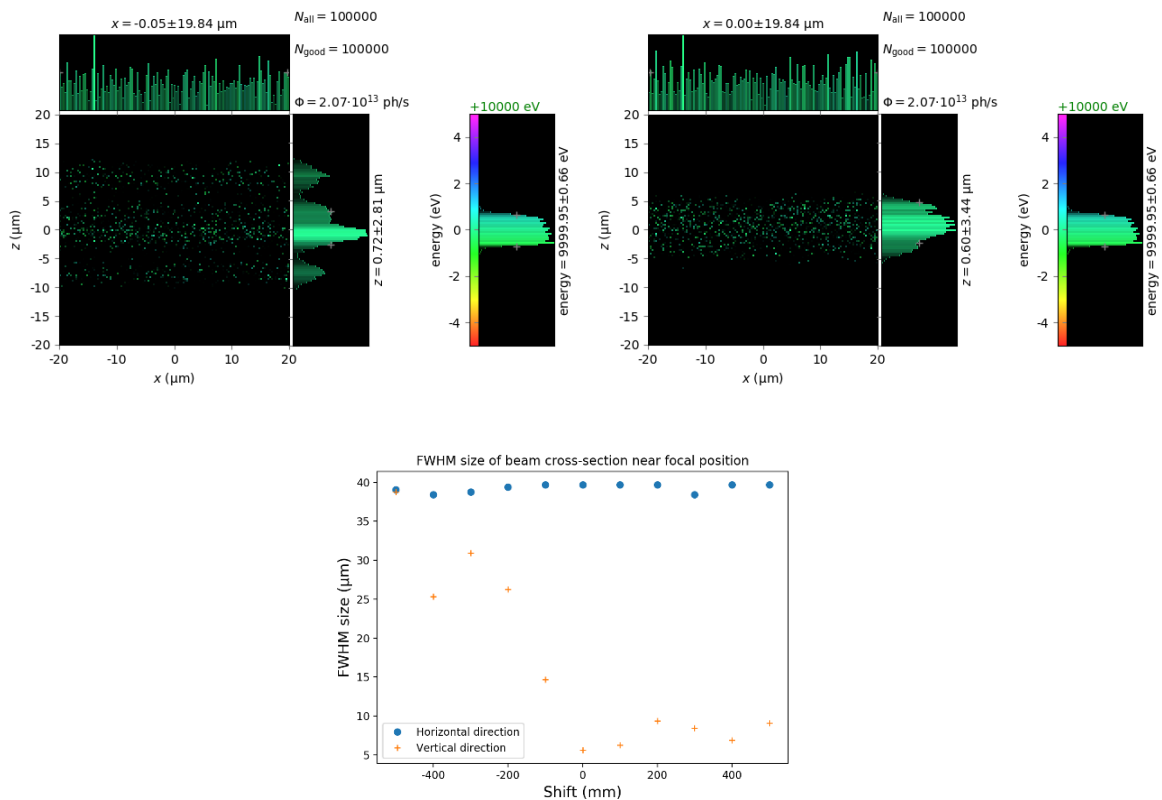


图 2-3 VFM 和 VCM 加载面形误差后的追迹结果，二次光源处。(a) 0mm, (b) 300mm, (c) 聚焦变化曲线

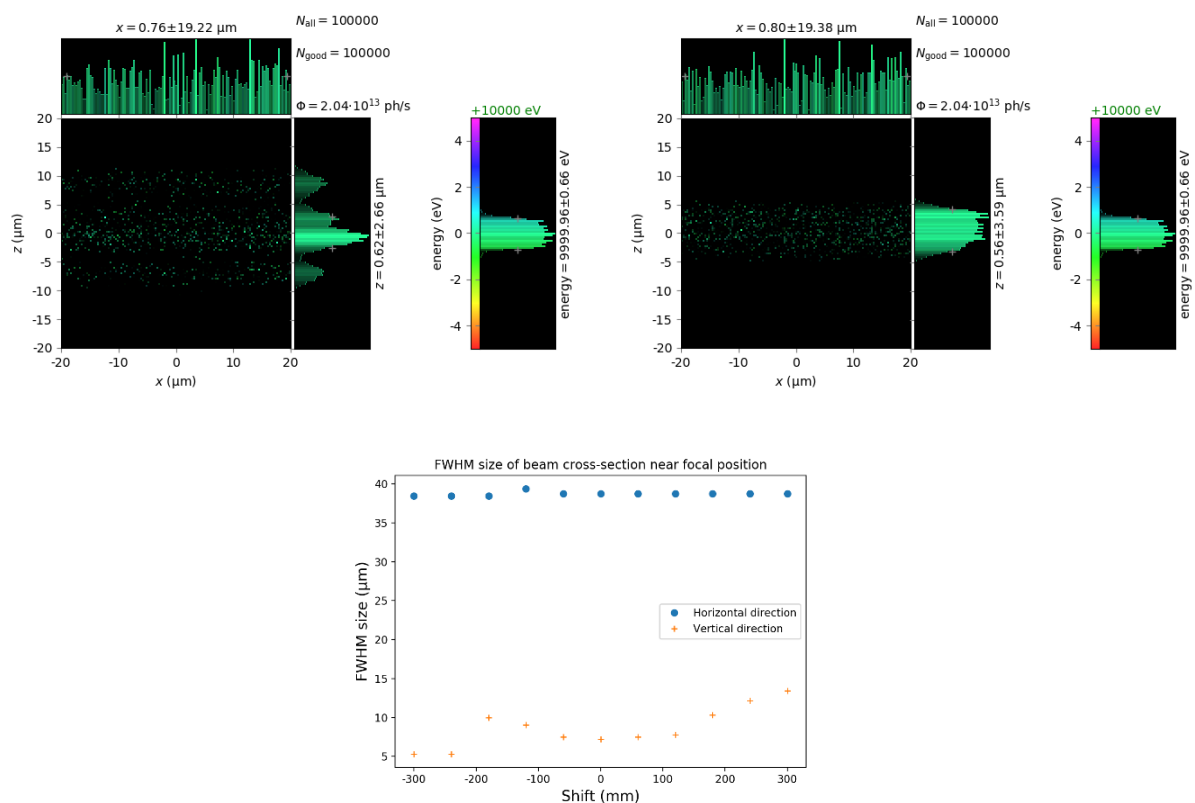
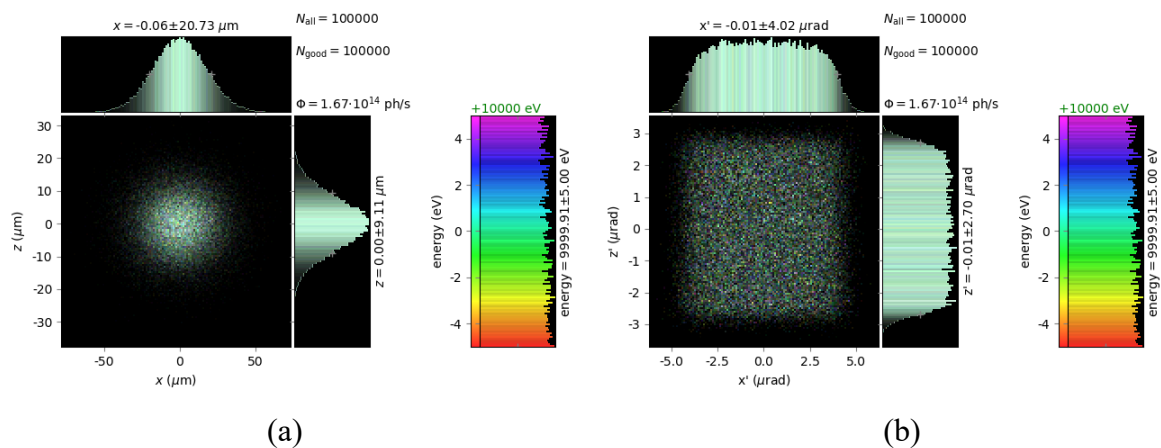
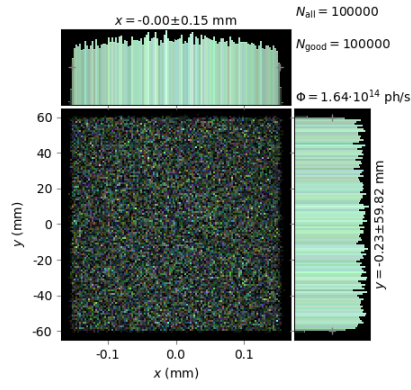


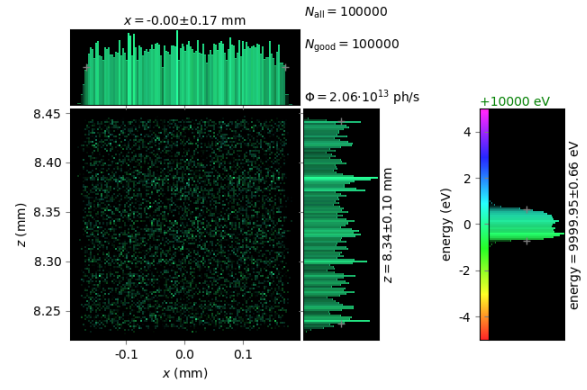
图 2-4 VFM 焦距调整后的追迹结果，二次光源处。(a) -300mm, (b) 0mm, (c) 聚焦变化曲线

亚微米聚焦光斑的情况，下图分别给出了，光源尺寸、发散角、VCM-footprint，单色器出光 (d)、VFM-footprint (e)、二次光源分布、VKB-footprint (g) 和 HKB-footprint (h) 以及样品处的光斑 (i)。

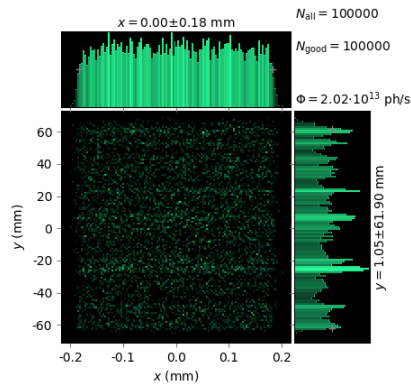




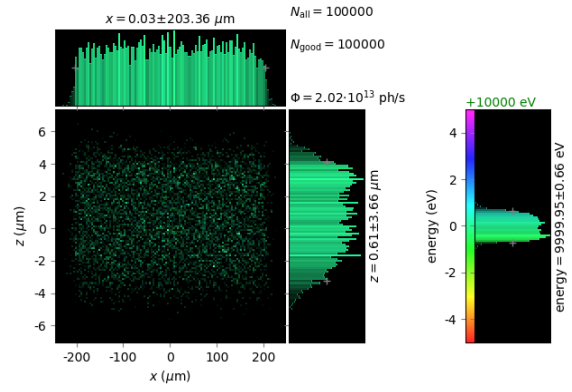
(c)



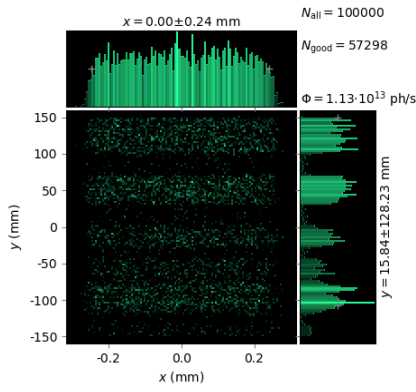
(d)



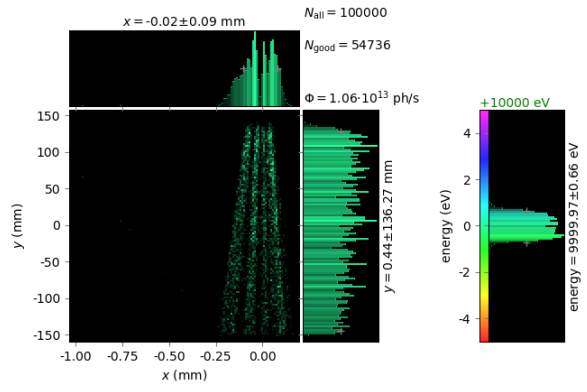
(e)



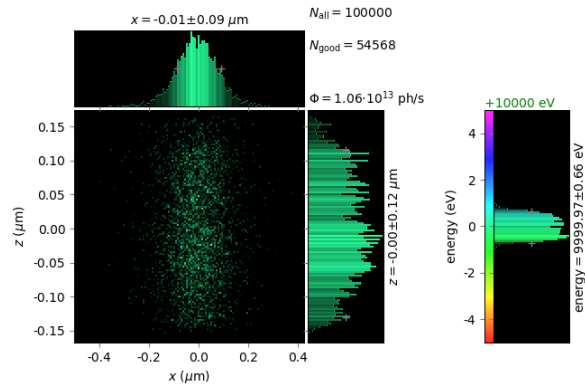
(f)



(g)



(h)



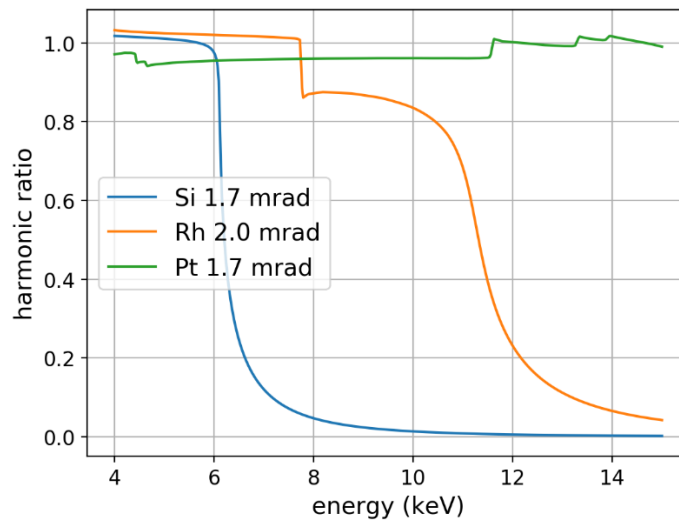
(i)

图 2-5 亚微米聚焦情况，各器件上的光场分布

谐波情况的计算情况如下，表中给出了各个器件后的通量追迹结果。同时，R_ratio_mirr 是理论计算的反射镜反射率的谐波比，它是决定器件谐波抑制贡献能力的体现，与追迹结果一致。阴影部分是起到谐波抑制的主要部件。可见单色器和反射镜共同构成了谐波抑制的主体。当能量小于 6keV 时，只有单色器和光源对谐波有抑制作用，满足不了谐波抑制的要求。当能量点在 7keV 时，反射镜 VCM 和 VFM 共同贡献下逐渐满足谐波要求。7.5keV 已能够满足谐波抑制的需求。

	光源	VCM	DCM	VFM	VKB	HKB
5@1st	3.13e14	3.03e14	2.8e13	2.7e13	1.50e13	1.40e13
3rd	1.3e14	1.28e14	1.08e12	1.06e12	5.72e11	5.49e11
谐波比	0.415	0.42	0.038	0.039	0.038	0.039
R_ratio_mirr		1.01	0.090	1.01	1.02	1.02
6@1st	3.12e14	3.03e14	3.13e13	3.05e13	1.66e13	1.53e13
3rd	8.61e13	8.17e13	7.33e11	6.96e11	3.67e11	3.47e11
谐波比	0.28	0.27	0.023	0.023	0.021	0.023
R_ratio_mirr		0.97	0.078	0.97	1.02	1.02
7@3st	1.49e14	1.45e14	1.62e13	1.58e13	8.75e12	8.06e12
9th	5.42e13	6.38e12	5.55e10	6.54e9	3.73e9	3.39e9
谐波比	0.36	0.044	3.43E-03	4.14E-04	4.26E-04	4.21E-04
R_ratio_mirr		0.12	0.078	0.12	1.01	1.01
7.5@3rd	1.54e14	1.51e14	1.76e13	1.72e13	9.42e12	8.66e12
9th	5.10e13	3.58e12	3.52e10	2.48e9	1.49e9	1.38e9
谐波比	0.33	0.024	0.002	1.44e-4	1.58e-4	1.59e-4
R_ratio_mirr		0.07	0.083	0.07	1.01	1.01

为了更直观体现谐波贡献，这里计算

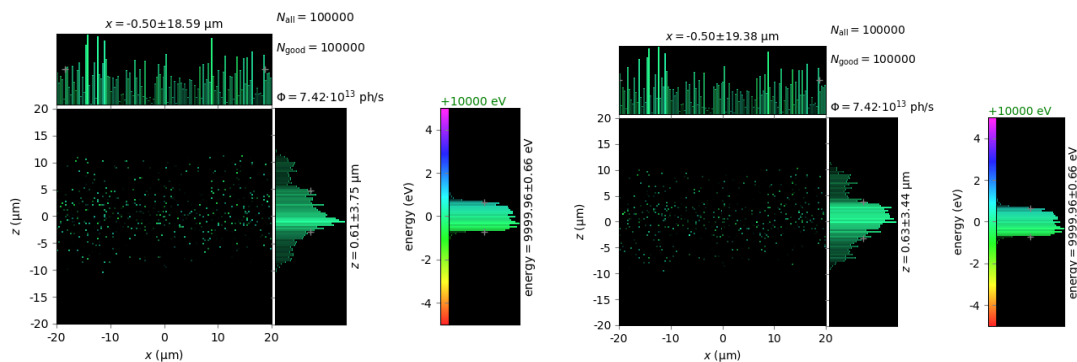


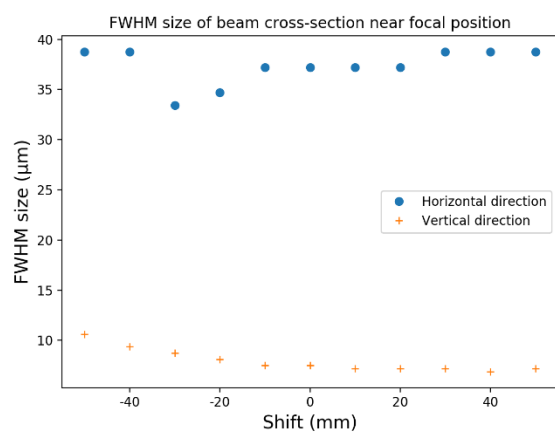
假设光源和单色器在 6-8keV 处不存在谐波抑制的跳变，设光源的谐波比为 0.42，单色器的谐波比为 0.09，为了达到 $1e-3$ 的谐波抑制，要求反射镜的谐波抑制为 0.034。当亚微米聚焦模式选择 VFM 和 VCM 是 Si - 1.7mrad，KB 是 Rh-2mrad 镀层，那么只能要求 VFM 和 VCM 的谐波抑制比例为 0.16，对应的能量点底线为 6.7keV。当能量小于 6.7keV 时，需要考虑其他谐波抑制方案。当亚微米聚焦模式选择 VFM、VCM 和 KB 均为 Si - 1.7mrad，对应的谐波抑制比为 0.4，对应的能量点为 6.3keV。—这种情况对应的微米聚焦的情形。

3 微米聚焦方案性能

3.1 反射镜误差对聚焦的影响

在亚微米聚焦中，光斑只是用了反射镜 VCM、VFM 的一个部分，而反射镜的误差选择是按照全局设计的。下图给出了 0 点位置和偏移 50mm 位置的光斑形状。以及焦点变化，此时 VFM 的焦距已调整为 4.5m。



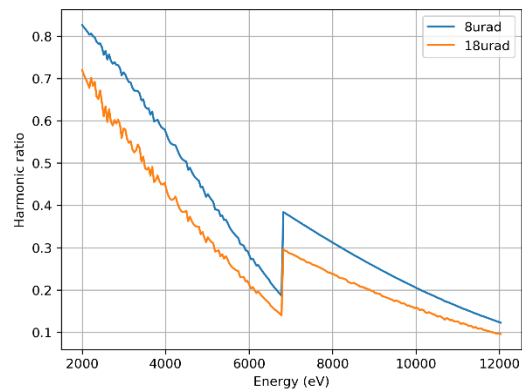


3.2 谐波情况

	亚微米		微米聚焦	
	光源	单色器	光源	单色器
7.5	1.55E+14	1.78E+13	7.55E+14	8.66E+13
	5.11E+13	4.98E+11	2.05E+14	1.78E+12
	3.30E-01	2.80E-02	2.72E-01	2.05E-02
		8.48E-02		7.55E-02
7	1.49E+14	1.69E+13	7.58E+14	8.39E+13
	5.45E+13	4.37E+11	2.17E+14	1.86E+12
	3.65E-01	2.59E-02	2.87E-01	2.22E-02
		7.09E-02		7.73E-02
6.8	1.48E+14	1.65E+13	7.58E+14	8.39E+13
	5.49E+13	5.19E+11	2.26E+14	2.05E+12
	3.71E-01	3.14E-02	2.98E-01	2.45E-02
		8.47E-02		8.21E-02
6.6	2.96E+14	3.20E+13	9.79E+14	1.06E+14
	6.01E+13	5.39E+11	1.56E+14	1.49E+12
	2.03E-01	1.69E-02	1.59E-01	1.41E-02
		8.32E-02		8.84E-02
6.4	3.03E+14	3.24E+13	1.02E+15	1.11E+14
	6.83E+13	6.56E+11	1.82E+14	1.57E+12
	2.26E-01	2.02E-02	1.78E-01	1.42E-02
		8.96E-02		7.96E-02
6.2	3.08E+14	3.23E+13	1.06E+15	1.11E+14
	7.73E+13	7.24E+11	2.05E+14	2.05E+12
	2.51E-01	2.24E-02	1.93E-01	1.86E-02
		8.95E-02		9.60E-02

6	3.12E+14	3.27E+13	1.11E+15	1.17E+14
	8.57E+13	8.47E+11	2.39E+14	2.28E+12
	2.75E-01	2.59E-02	2.15E-01	1.94E-02
		9.41E-02		9.02E-02

首先计算光源一定口径接收角下，插入件谐波比的情况。



接着光线追迹光源-单色器的谐波抑制效率。

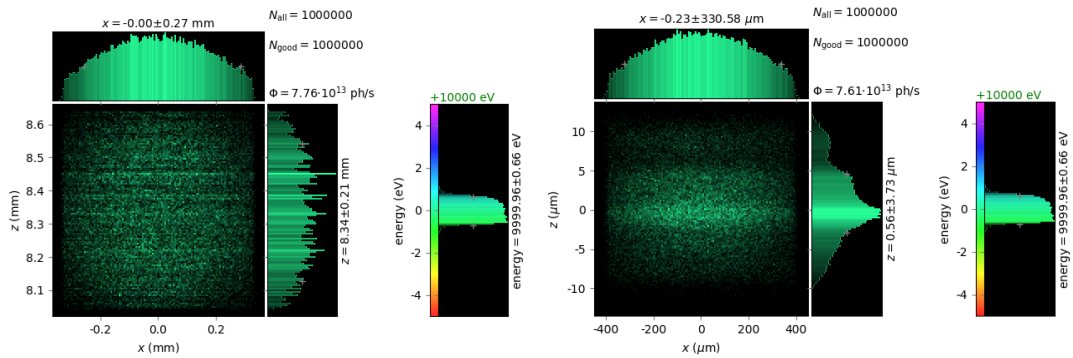
	亚微米		微米聚焦	
能量 keV	光源	单色器	光源	单色器
7.5@3	1.55E+14	1.78E+13	7.55E+14	8.66E+13
	5.11E+13	4.98E+11	2.05E+14	1.78E+12
	3.30E-01	2.80E-02	2.72E-01	2.05E-02
		8.48E-02		7.55E-02
7@3	1.49E+14	1.69E+13	7.58E+14	8.39E+13
	5.45E+13	4.37E+11	2.17E+14	1.86E+12
	3.65E-01	2.59E-02	2.87E-01	2.22E-02
		7.09E-02		7.73E-02
6.8@3	1.48E+14	1.65E+13	7.58E+14	8.39E+13
	5.49E+13	5.19E+11	2.26E+14	2.05E+12
	3.71E-01	3.14E-02	2.98E-01	2.45E-02
		8.47E-02		8.21E-02
6.6@1	2.96E+14	3.20E+13	9.79E+14	1.06E+14
	6.01E+13	5.39E+11	1.56E+14	1.49E+12
	2.03E-01	1.69E-02	1.59E-01	1.41E-02
		8.32E-02		8.84E-02
6.4@1	3.03E+14	3.24E+13	1.02E+15	1.11E+14
	6.83E+13	6.56E+11	1.82E+14	1.57E+12
	2.26E-01	2.02E-02	1.78E-01	1.42E-02
		8.96E-02		7.96E-02
6.2@1	3.08E+14	3.23E+13	1.06E+15	1.11E+14
	7.73E+13	7.24E+11	2.05E+14	2.05E+12

	2.51E-01	2.24E-02	1.93E-01	1.86E-02
		8.95E-02		9.60E-02
6@1	3.12E+14	3.27E+13	1.11E+15	1.17E+14
	8.57E+13	8.47E+11	2.39E+14	2.28E+12
	2.75E-01	2.59E-02	2.15E-01	1.94E-02
		9.41E-02		9.02E-02

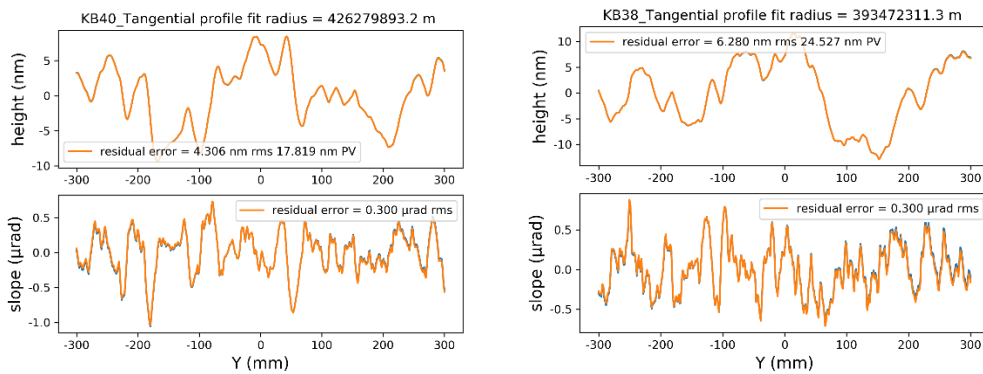
从表中可以看出这两个设备的谐波比总贡献基本上在 0.02 的水平。单色器的谐波抑制性能基本在 10%-7%的水平。大接收口径和小接收口径中，单色器和单色器的比重各有不同。

3.3 聚焦光斑性能

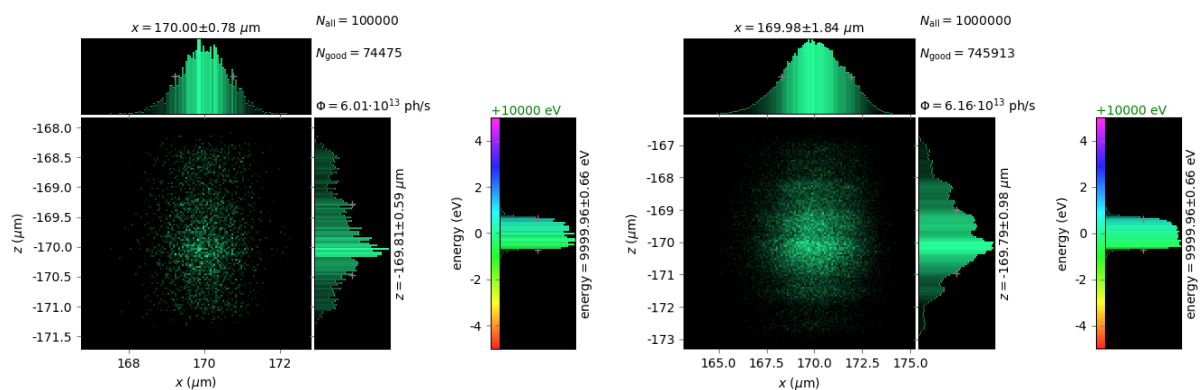
单色器后和二次光源处的光斑分布，通量分别为 7.76×10^{13} 和 7.61×10^{13} phs/s。



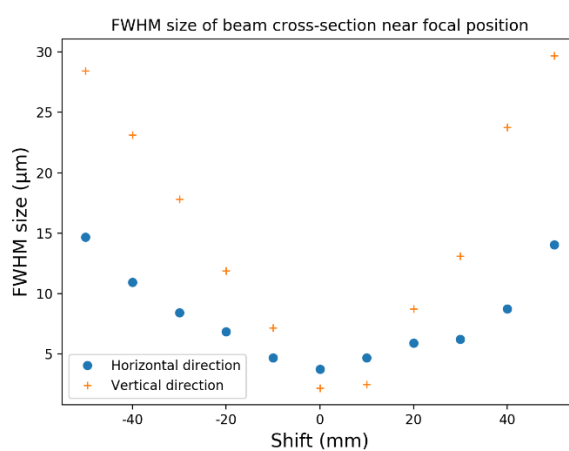
KB 镜加载误差如下图所示。



有无误差时，聚焦光斑的分布：



改变观察平面位置，我们看到 0 平面基本上是最小光斑位置，即焦点位置。



4 聚焦位置的确定

5 存在问题

反射镜的面形误差局域与全局的不同，给仿真带来了不确定性。本仿真过程中，将居于面形误差补偿至最佳，但是对于能量扫描应用，出高问题有可能会带来不确定的结果。