

HEPS 工程工作笔记

HEPS Technical Note

标题 (Title)	SRW 和 XRT 的波动计算复核 1 – 光源发光特征的计算		
作者 (Author)/ 系统 (System)	杨福桂	日期 (Date)	2020-2-7
编号 (Serial No.)		页数 (Pages)	共 页 (含附件)
摘要 (abstract): 以 HEPS-B3 和 B8 两条束线为模型，使用 XRT 和 SRW 计算光源发光和电子束团发光特性。主要考虑单电子与多电子发光特性，以及仿真软件波动计算结果的比对。			
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 束线光学设计需求综述

HEPS-B3 和 B8 分别处于低和高 beta 直线节。储存环和光源参数如表格 1 1 所示。

	HEPS-B3	HEPS-B8
储存环		
电子能量 (GeV)	6	6
电流强度 (GeV)	0.2	0.2
能散	0.00111	0.00111
电子尺寸 (μm)	8.8*2.3	16.7*5.1
电子束团发散角 (μrad)	3.1*1.2	1.65*0.53
Beta function	2.84*1.92	10.12*9.64
发射度 (pm*rad)	27.28*2.76	27.55*2.70
插入件		
能量点@谐波级次	23keV@1st	10keV@3st
λ/2π (pm.rad)	19.74	19.74
周期 (mm)	12	35
周期数	180	142

表格 1-1 光源参数列表

2 仿真束线布局

由于光源处发光点的位置非确定，因此这里需要从波动计算结果分析光源尺寸。仿真束线布局图如图 2-1 所示。这里使用了椭圆柱面形的 KB 镜作为聚焦器件。为了去除口径衍射的影响，KB 镜的接收角度大于 4σ，这里选择为 25μrad。考虑掠入射角 4mrad，对应的反射镜长度约为 250mm。基于此，确定反射镜位置为 40m 和 40.3m，反射镜长度为 300mm。

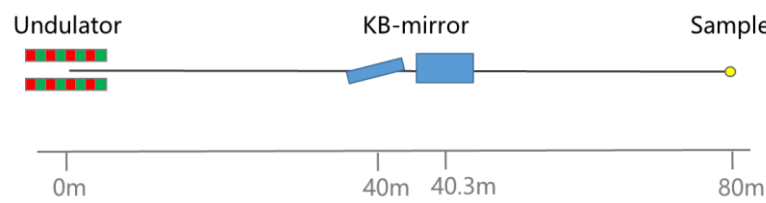


图 2-1 仿真布局图

3 SRW 波动仿真计算

3.1 单电子发光波动计算

光源出射到 40m 位置时的光场分布，半高全宽为 $304\mu\text{m}\times 312\mu\text{m}$ ，传播距离为 40m，由此可以计算光束发散角为 $7.6\mu\text{rad}\times 7.8\mu\text{rad}$ FWHM，或者 $3.23\mu\text{rad}\times 3.32\mu\text{rad}$ RMS。

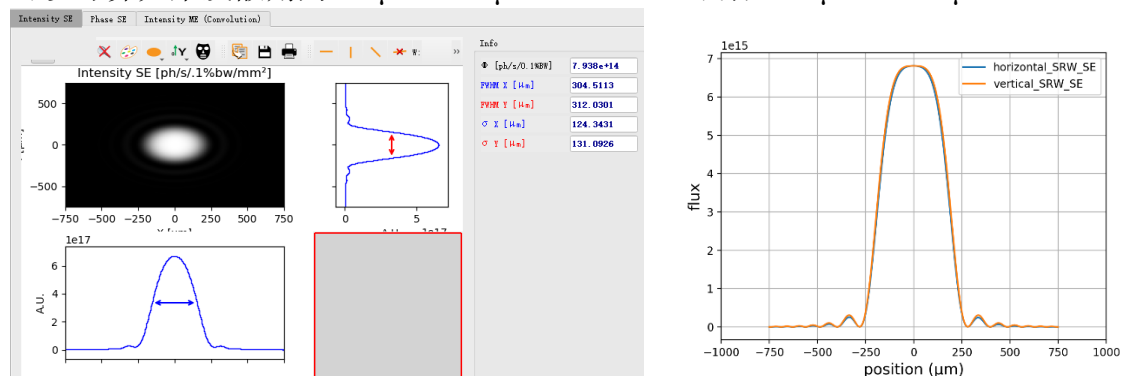


图 3-1 40m 处光场分布

为了观察光源的光斑尺寸，SRW 提供了两种方法，如图 3-2 所示。一种是通过 Back Propagation 组件，把波前逆向传播至光源处；第二种方式是使用理想透镜成像，缩放比为 1:1。为了与 XRT 计算对应，这里同时考虑第三种方式，即 KB 镜聚焦，该模式下缩放比分别为 1.01:1(H)和 1:1(V)。结果如图 3-3 所示，光源点的单光子发光尺寸为 $12.5\mu\text{m}\times 12.5\mu\text{m}$ FWHM， $5.37\mu\text{m}\times 5.37\mu\text{m}$ RMS。注意这里的统计值直接由 FWHM 算出，因此与图中显示值有所差异。

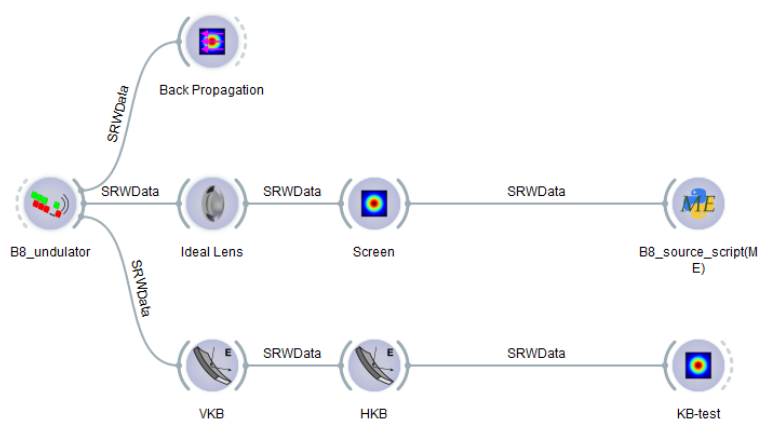
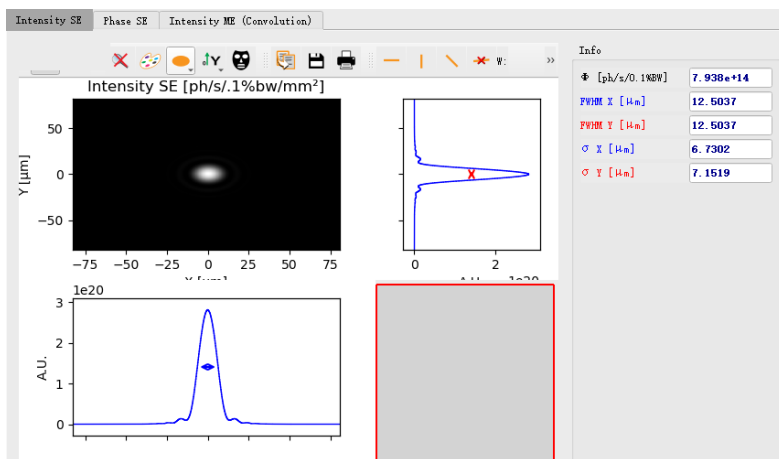
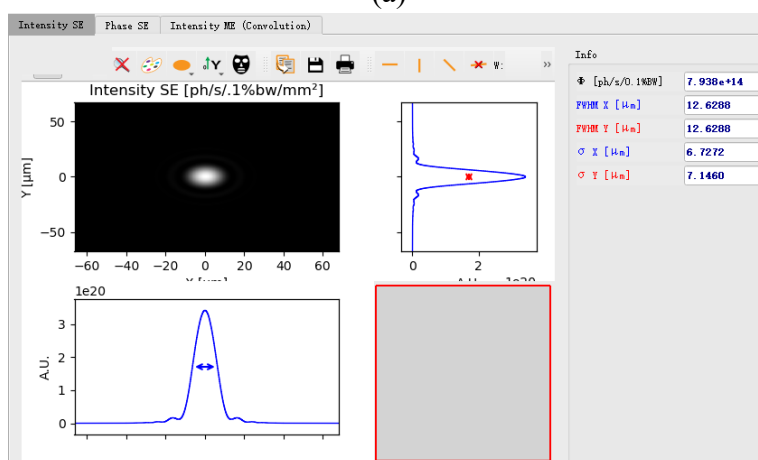


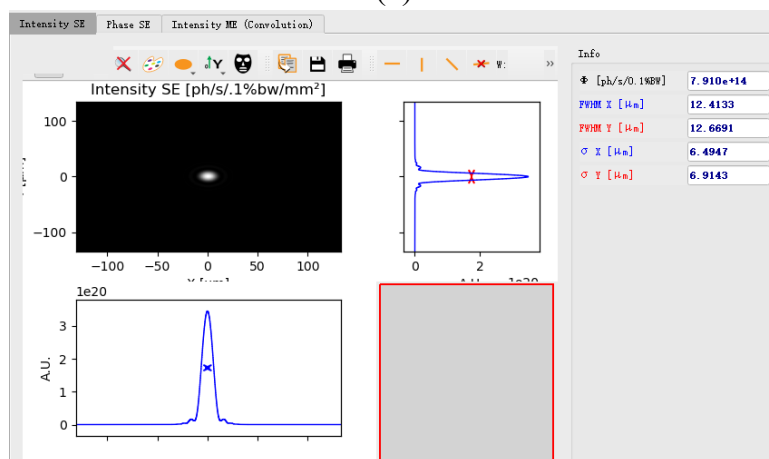
图 3-2 SRW 光源尺寸测量



(a)



(b)



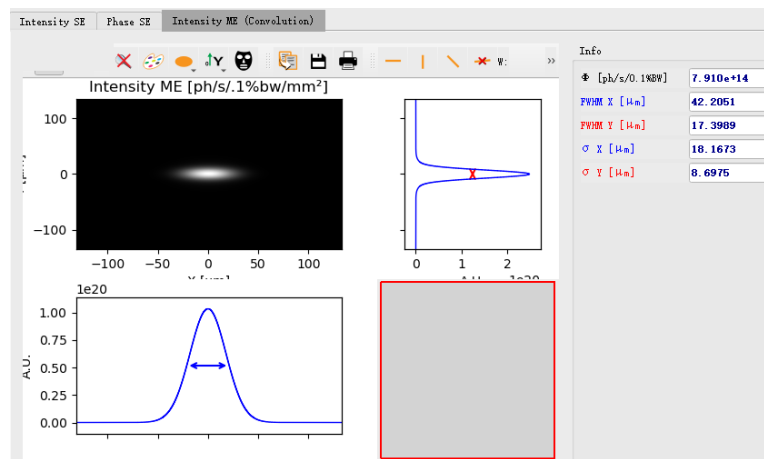
(c)

图 3-3 SRW 三种不同方式计算的单光子发光尺寸

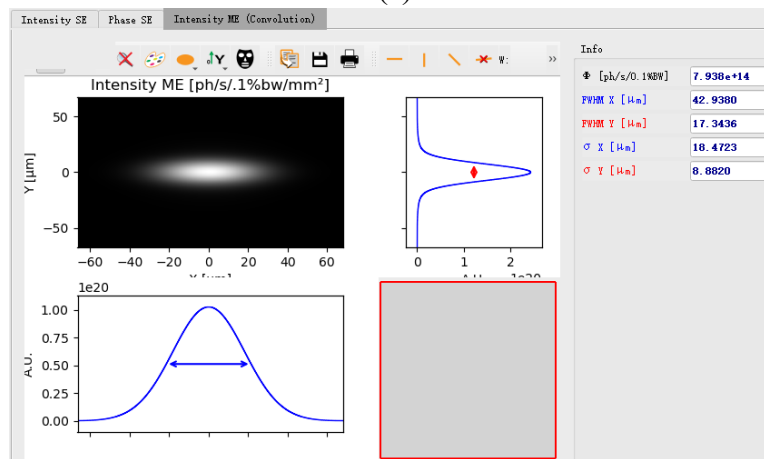
3.2 电子束团波动计算

接着考虑电子束团，SRW 提供两种考虑电子束团尺寸的方案，一种是 Monte Carlo 追迹，另外一种为卷积，该计算由单电子追迹卷积直接获得。对应图 3-3，图 3-4 给出

了卷积的计算结果。



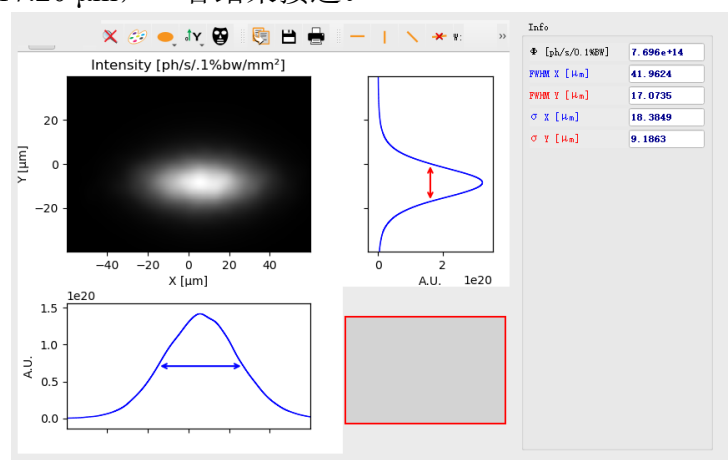
(a)



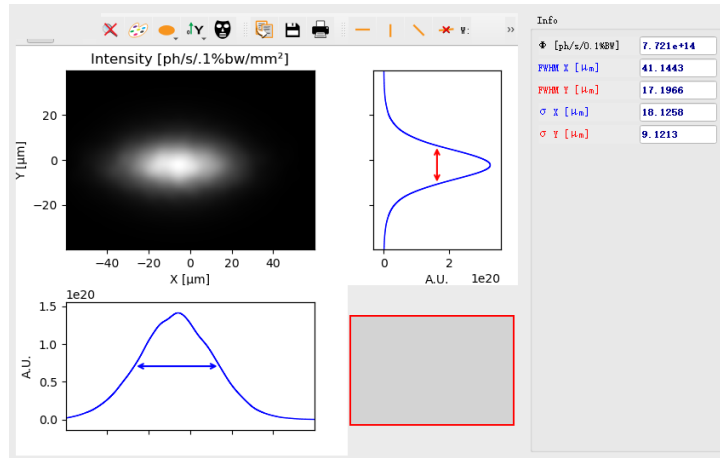
(b)

图 3-4 理想透镜成像和 KB 镜成像的多电子卷积结果

接着开展对 SRW 多电子束团的 Monte-Carlo 计算，分别对应理想透镜和 KB 镜成像两种方式。如图 3-5 所示，追迹电子数为 10000，光斑的半高全宽分别为 $41.96\mu\text{m} \times 17.07\mu\text{m}$ 和 $41.14\mu\text{m} \times 17.20\mu\text{m}$ ，二者结果接近。



(a)



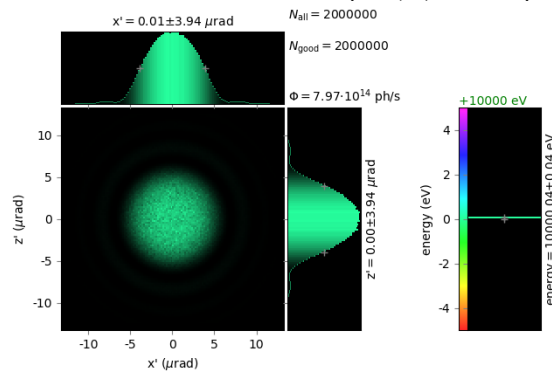
(b)

图 3-5 理想透镜(a)和 KB 镜(b)成像样品处的光斑分布

4 XRT 波动仿真计算

4.1 单电子发光波动计算

在 XRT 中将系统的发射度和能散设置为 0，可以模拟单电子发光的情况。图 4-1 给出了典型位置的追迹结果。从图(b)可以得到单电子发光的角度为 $312/40=7.8\mu\text{rad}$ ，从图(b)可以得到发光尺寸为 $5.86\mu\text{m} * 2 * 40.3\text{m}/39.7\text{m}=11.89\mu\text{m}(\text{H})$ ， $6.33\mu\text{m} * 2=12.66\mu\text{m}(\text{V})$ 。



(a)

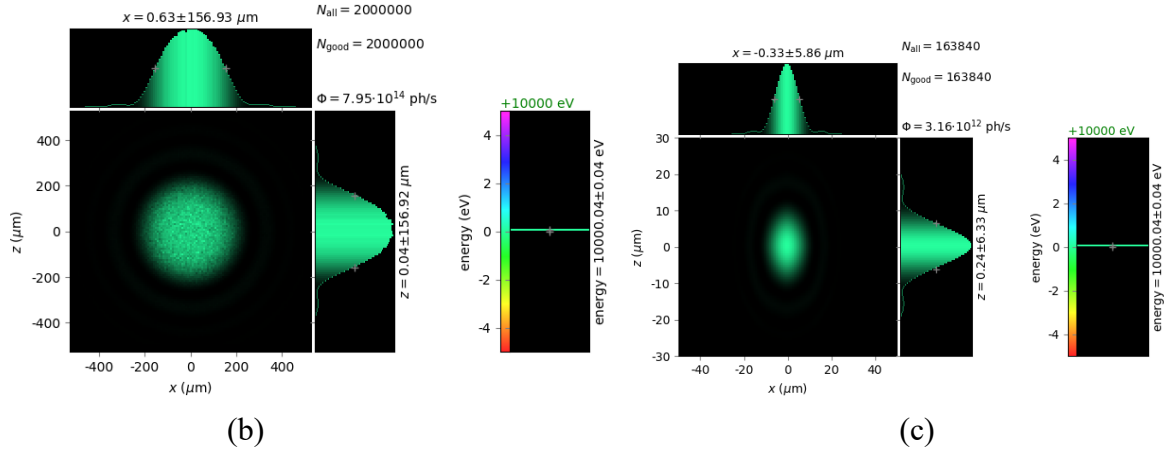


图 4-1 光源发散角(a), VKB 位置(b)和样品处(c)的光场分布

4.2 电子束团波动计算

追迹投点 10000 个, 每个点计算 $5e4$ 个光线, 计算单个能量点的情况。仿真结果如图 4-2 所示, 图(a)显示电子投点数已经能够体现电子束团的特征。图(b)和图(c)显示光场的发散角为 $6.43 \times 2 = 12.86 \mu\text{rad}(\text{H})$, $6.85 \times 2 = 13.7 \mu\text{rad}(\text{V})$ 。图(d)给出了样品处光斑尺寸为 $21.48 \times 2 \times 40.3/39.7 = 43.6 \mu\text{m}(\text{H})$, $8.67 \times 2 \times 40/40 = 17.34 \mu\text{m}(\text{V})$ 。

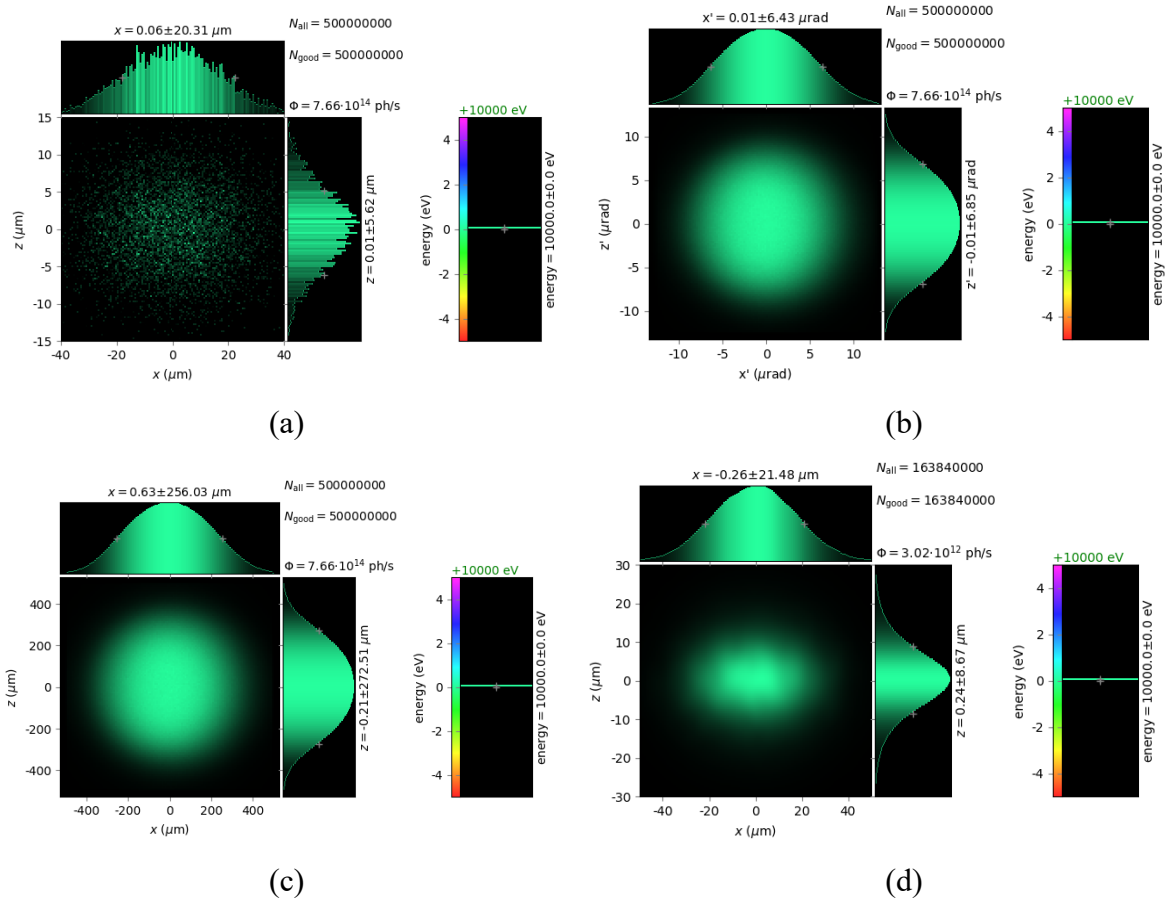


图 4-2 XRT 电子束团追迹图，分别是电子束团分布(a)，发散角， VKB 位置和样品处光场分布

5 总结

同样开展 B3 束线的仿真，B3 和 B8 束线的统计结果如表 5-1 所示。SRW 多电子波前的发散角比 XRT 稍微大一些，差异再 10%以内。这里数值的差异还需要考虑计算精度、显示图像的精度等因素。

	HEPS-B3		HEPS-B8	
FWHM	XRT	SRW	XRT	SRW
单电子发光尺寸 (μm)	5.32×5.32	5.53×5.53	11.89×12.66	12.5×12.5
单电子发光发散角 (μrad)	7.88×7.88	7.72×7.72	7.8×7.8	7.6×7.8
总发光尺寸 (μm)	21.1×7.4	22.25×8.0	43.6×17.34	41.14×17.20
总发散角(μrad)	10.42×9.76	11.47×9.7	12.86×13.7	12.9×13.87

表 5-1 光源特性计算值汇总

作为参考，根据理论计算，可以得到 B8 束线的结果：

Single electron radiation size = (x)5.587 μm RMS， 13.1μm FWHM

Single electron radiation divergence = (x)3.532 μrad RMS， 8.3μrad FWHM

Single electron radiation emittance = 19.733 pm rad

Total photon size (x)17.710 and (y)7.801 μm RMS， (x)41.6 and (y)18.33 μm FWHM

Total photon divergence (x)6.073 and (y)5.868 μrad RMS， (x)14.27 and (y)13.789 μrad FWHM

B3 束线的结果：

Single electron radiation size = (x)2.429 μm RMS， 5.71 μm FWHM

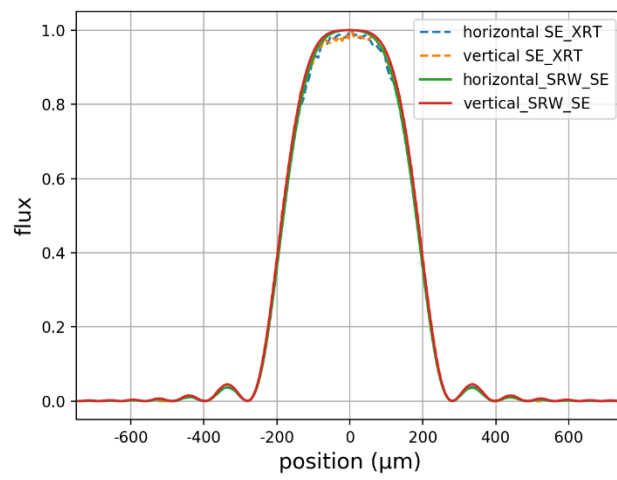
Single electron radiation divergence = (x)3.532 μrad RMS， 8.30μrad FWHM

Single electron radiation emittance = 8.579 pm rad

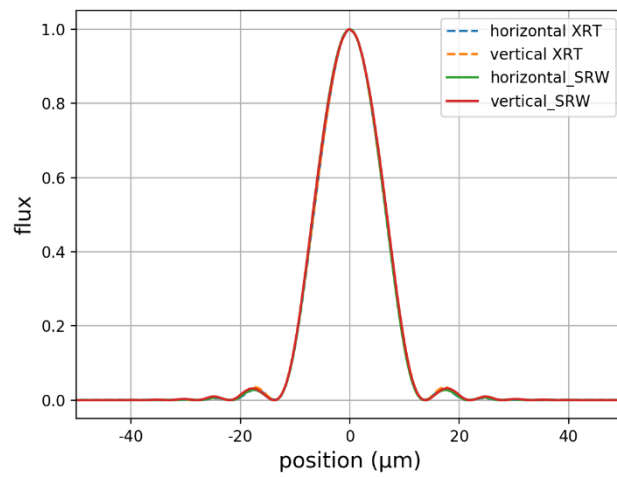
Total photon size (x)9.136 and (y)3.364 μm, (x)21.470μm and (y)7.906 μm FWHM

Total photon divergence (x)5.281 and (y)4.441 μrad， FWHM (x)12.411 and (y)10.436 μrad

为了方便观察曲线的差异，将中心线的分布画在同一幅图里，如图 5-1 和图 5-2 所示。单电子情况下，只考虑 40m 处的光场分布，和样品处的光场分布。SRW 和 XRT 均使用 KB 聚焦模式计算情况。单电子成像完全一致。但对于电子束团的曲线，投点数 1e4 仍有待进一步提高。但垂直方向的一致性，说明该计算结果的正确性。

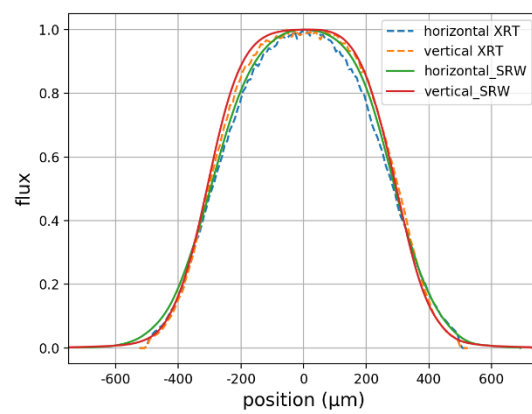


(a)

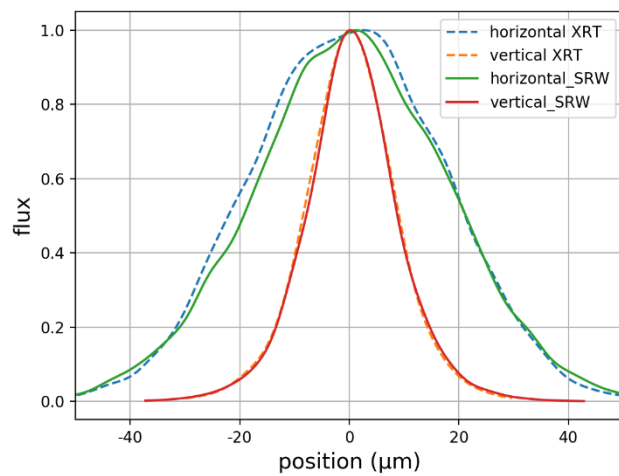


(b)

图 5-1 单电子追迹结果，VKB(a)和样品(b)处的光场分布



(a)



(b)

图 5-2 多电子追迹结果，VKB(a)和样品(b)处的光场分布

6 工作中的问题

(1) XRT 的 KB 镜建模过程中发现，KB 镜聚焦参数设置仍需进一步考虑，按照现在的参考，VKB 和 HKB 焦点不重合，且中心位置偏离预期中心，当掠入射角减小为 $2e-3\text{rad}$ 时，该值减小到很小。但该误差不影响本算例的计算结论。

(2) KB 聚焦计算中，SRW 的图像中心位置偏离波动计算光斑中心位置，这包括 VKB 的位置和样品位置。多电子追迹存在此问题，单电子追迹未发现该问题。