

HEPS 工程工作笔记

HEPS Technical Note

标题 (Title)	CRL 器件 – XRT 和 SRW 波动计算比对		
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)
<div>摘要 (abstract):</div> <div>复合折射率透镜（CRL）是高能同步辐射光源 HEPS 的重要器件。为了保证仿真计算的准确性，需要对不同软件下 CRL 聚焦性能的评估。这里考虑 B3 和 B8 两条束线，在单色光情况下的聚焦情况。 需要考虑口径、焦距（组数）等因素的影响。</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

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。

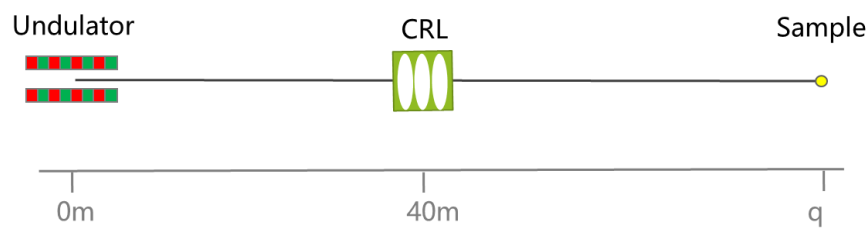


图 2-1 仿真布局图

在 XRT、SRW 使用的折射率参数不同， $\delta = 1 - n_{real}$ 。

	Attenuation length (m)		δ	
	XRT	SRW	XRT	SRW
10keV	0.0088357	0.0083543	3.40239e-06	3.413595e-06
23keV	0.0270313	0.0265456	6.427981e-07	6.43869e-07

图 2-2 Be 透镜参数，考虑不同的软件

透镜焦距为 $f = \frac{2R}{\delta}$ ，基于 XRT 的折射率数据计算的透镜光焦度如表格 2-1。折射率差异 0.32%@10keV, 0.16%@23keV。考虑到系统的接收口径，B8 束线使用两个 300 μm 曲率半径的 Be CRL 组，焦距为 22.045m。在口径上，CRL 前放置了一个 1mm 直径的光阑，对应的系统接受角约为 4σ 。

$R(\mu\text{m})$	$\varphi \text{ (m}^{-1}\text{)}@10\text{keV}$	$\varphi \text{ (m}^{-1}\text{)}@23\text{keV}$	$D(\text{mm})$
50	0.13610	0.02571	0.504
100	0.0	0.0	0.716
200	0.0	0.0	1.008
300	0.02268	0.004285	1.236
500	0.0	0.0	1.588
1000	0.0	0.0	2.256
2000	0.0	0.0	3.188

表格 2-1 CRL 特性参数表

由于本工作的主要目的是 XRT 软件和 SRW 软件中 CRL 组件计算结果的比对。这里主要考虑单电子发光。

3 SRW 波动仿真计算

为了观察光源的光斑尺寸，SRW 提供了两种方法，如图 3-1 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。第三种方式是使用真实的 CRL。由于长焦距和短焦距 CRL 的性能有所差异，包括吸收和光程差的变化，这里我们还要评估不同焦距透镜组的聚焦情况。在每一种计算中，需要精确计算透镜焦距和像点位置。

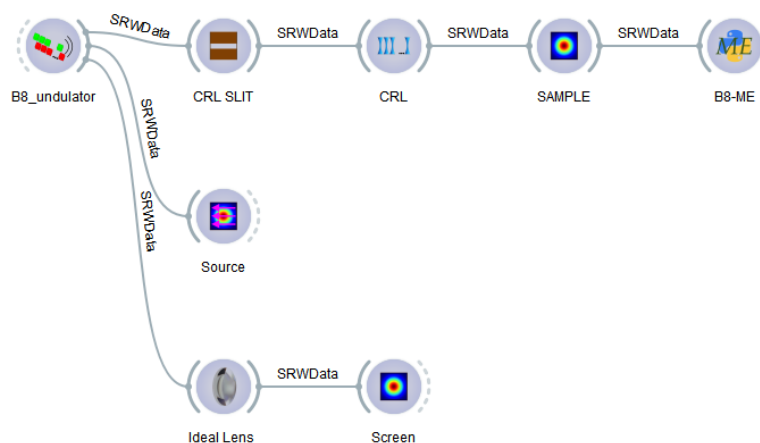
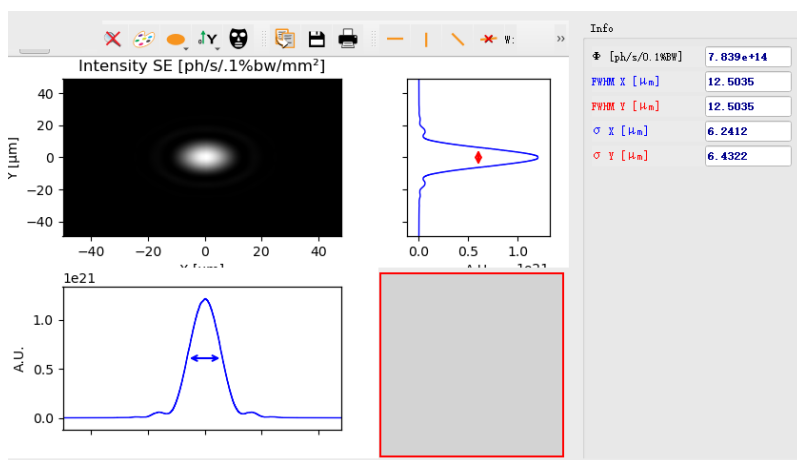


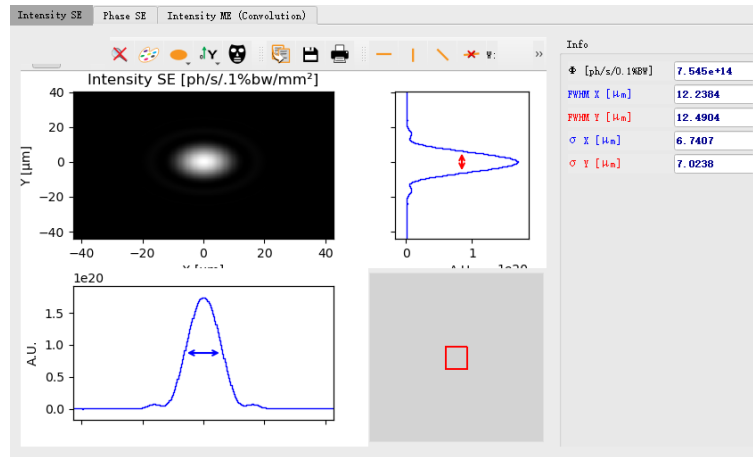
图 3-1 SRW 仿真程序

3.1 长焦距情况（22m）

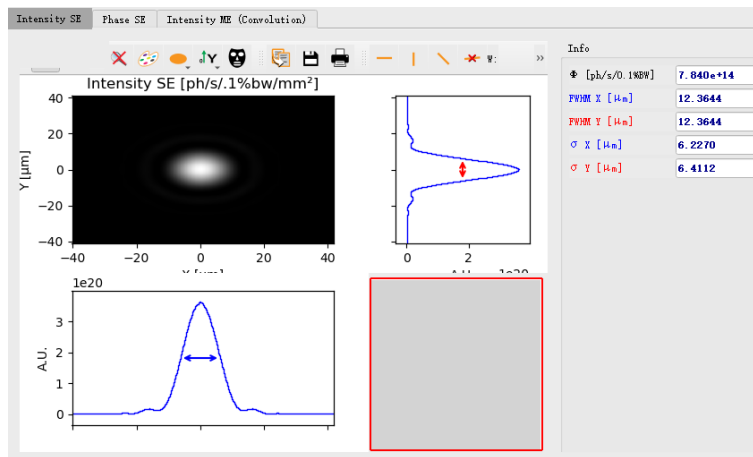
第三种方式是使用真实的 CRL，两个曲率半径为 $300\mu\text{m}$ 的 Be 透镜。样品点位置在 88.18m 处，构成 1: 1 成像。仿真结果如图 3-2 所示，光源点的单光子发光尺寸为 $12.5\mu\text{m} \times 12.5\mu\text{m}$ FWHM， $12.23\mu\text{m} \times 12.49\mu\text{m}$ FWHM 和 $12.36\mu\text{m} \times 12.36\mu\text{m}$ 。结果一致说明，此时 CRL 接近理想成像。



(a)

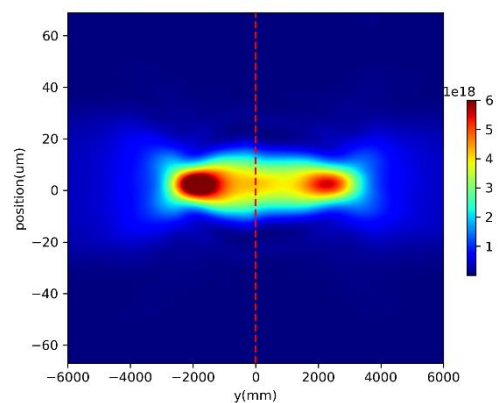


(b)



(c)

图 3-2 SRW 三种不同方式计算的单光子发光尺寸，(a)backpropagation；(b)理想 CRL 和(c)真实 CRL 成像



(a)

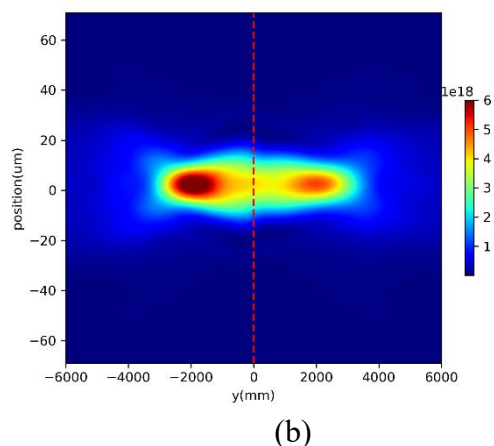


图 3-3 理想透镜和真实 CRL 的 xy 截面图

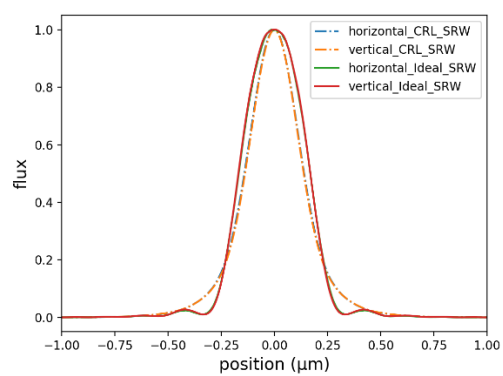
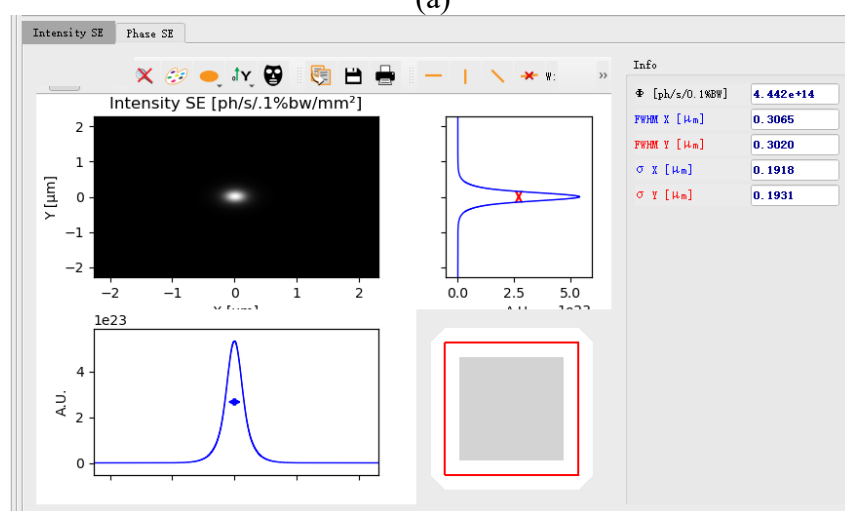
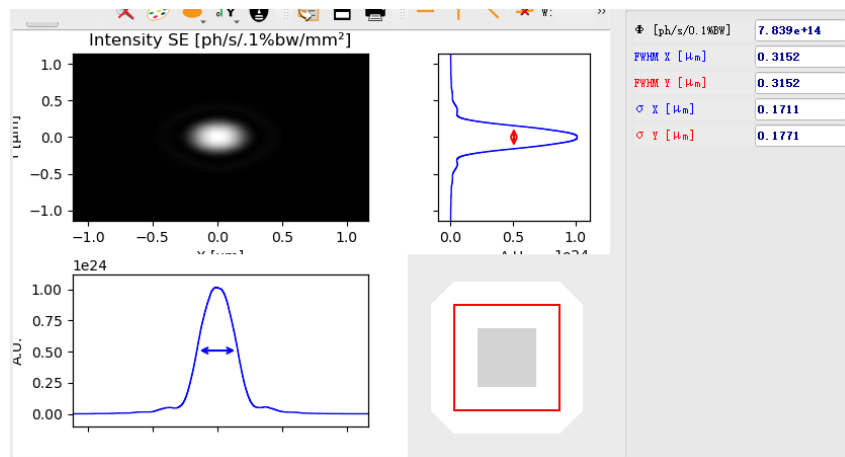
3.2 短焦距情况（1m）

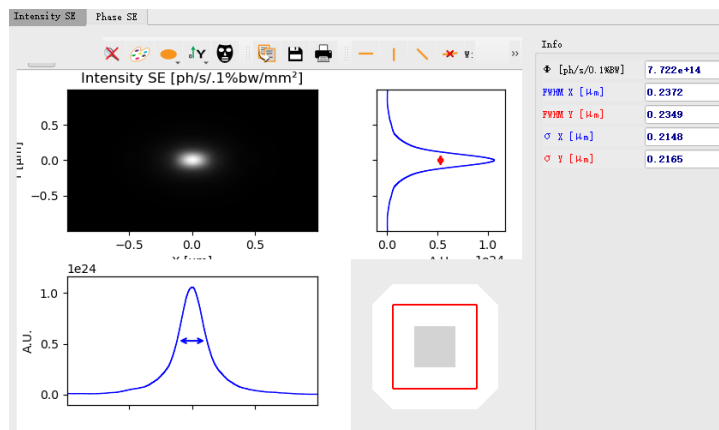
考虑使用 40 组 $300\mu\text{m}$ 的 Be 透镜，可以计算焦距为 1.103m ，像距为 1.131m 。理想透镜的焦距设置成 1.103m ，对应像距为 1.131m 。SRW 中真实透镜的焦距为 1.1002638279413 ，对应的像距为 1.128m 。考虑到像平面位置可能存在移动，这里计算了不同位置的光斑尺寸，如表格 3-1 所示，可以看到 1.130m 处的光斑符合缩放比的，且处于局部最小。注意，在计算中，推荐使用 Quadratic Term Special，该方法可以在比较小的采样数下获得正确结果。图 3-5 更直观地给出了焦点位置的变化（纠错，SRW 结果的纵坐标需要减小 10 倍）。红线理想成像位置点。

位置	理想透镜成像	真实 CRL
1.135	1.2289*1.2672	1.5837*1.6292
1.133	0.5107*0.5219	1.0619*1.0857
1.131	0.3254*0.3298	0.5191*0.5236
1.130	0.3152*0.3152	0.3046*0.3001
1.129	0.2372*0.2349	0.3093*0.3093
1.128	0.6360*0.6427	0.3082*0.3082
1.127	0.9945*1.0162	0.2951*0.2906
1.126	1.3243*1.3639	0.5235*0.5325
1.125	1.5995*1.6525	0.8031*0.8150

表格 3-1 不同位置处的光斑尺寸变化

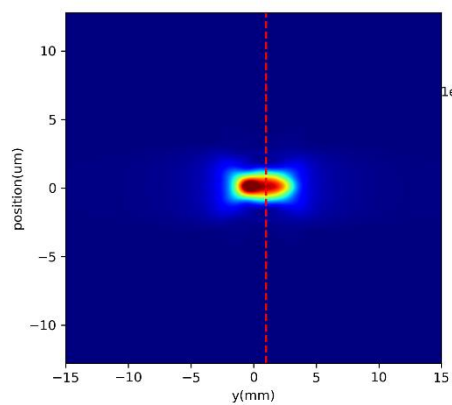
1.130m 处的追迹结果见图 3-4，相比于理想透镜成像，很明显大角度位置的光场匀滑。



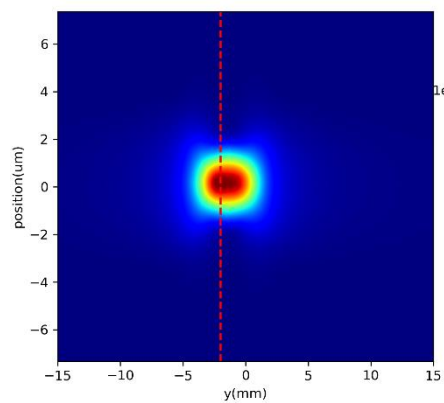


(d)

图 3-4 理想透镜聚焦(a)和真实 CRL 聚焦(b)的分布图, (c)一维曲线对比; (d)是理想透镜成像 1.129m 处的分布



(a)



(b)

图 3-5 理想透镜聚焦(a)和真实 CRL 聚焦(b)的分布图 xy 截面图, y 为光线传播方向

4 XRT 波动仿真计算

4.1 长焦距情况（22m）

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。可以看出在透镜的焦点位置，光斑并不是最小位置。对比图 b 和图 c，可以看出离焦位置峰值强度增加，但是分布偏离高斯分布，拖尾问题增加。

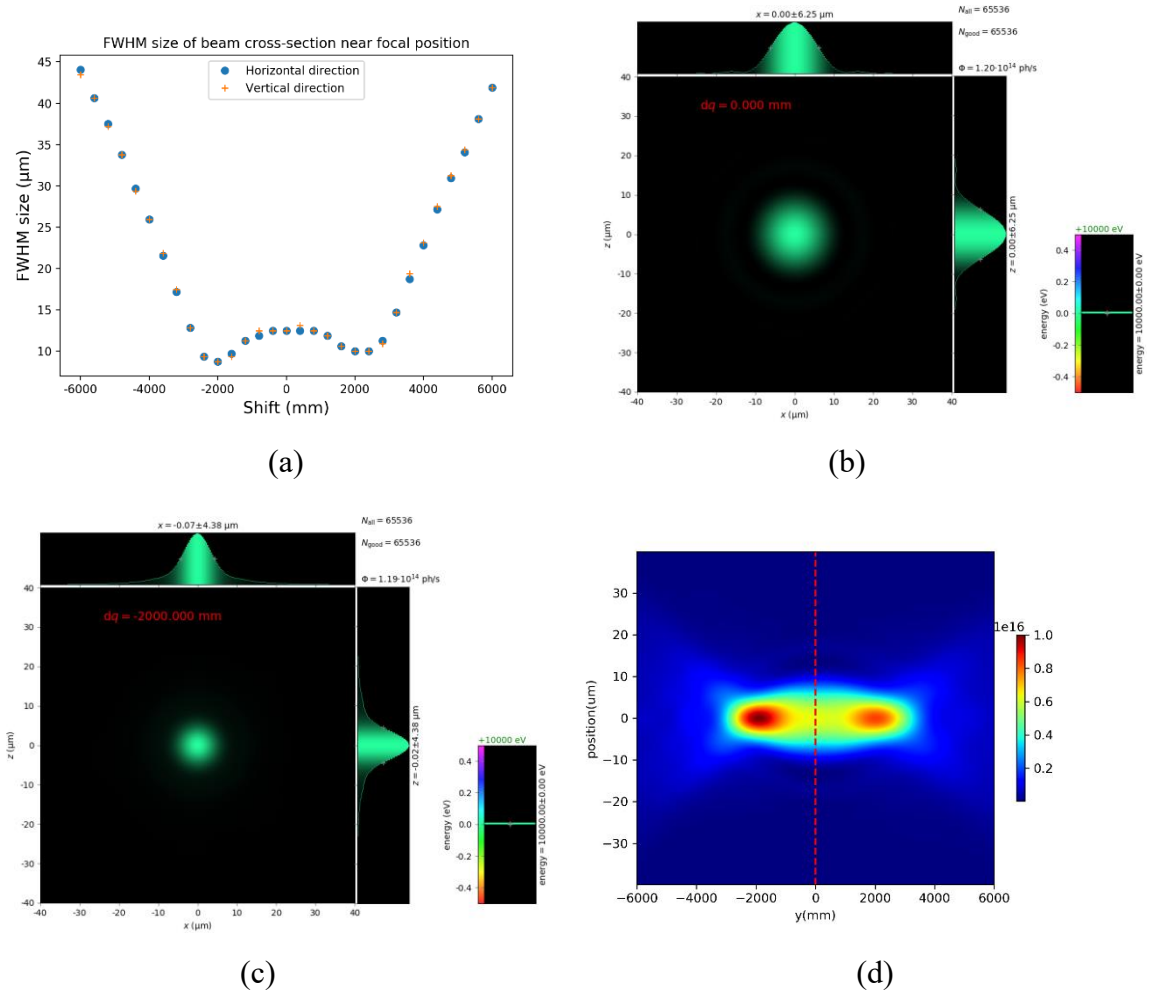
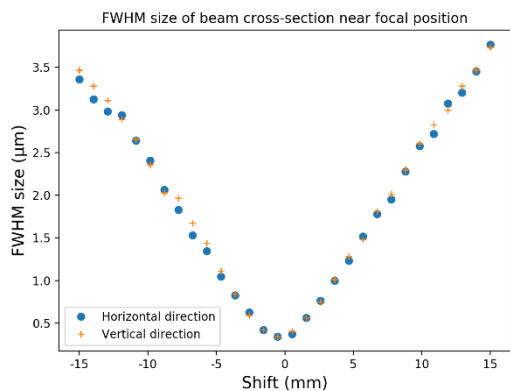


图 4-1 长焦距透镜的单电子波动传播结果

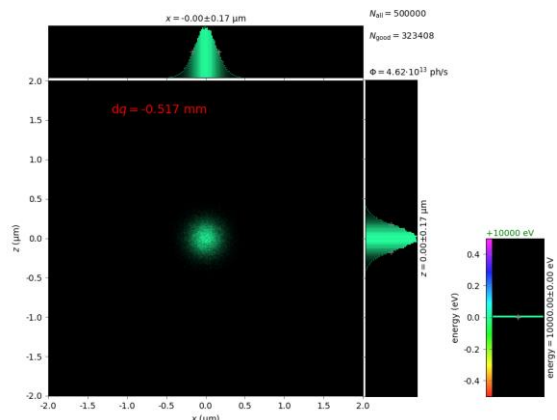
4.1 短焦距情况（1m）

在 XRT 中，透镜的模型是具有一定厚度和间距的薄板，因此透镜成像位置并不是从最后一块透镜算起，需要寻找焦平面位置。在 XRT 中，可以使用光线几何追迹计算焦点位置，图 4-2 给出了光斑尺寸在不同位置处的分布曲线(a)，样品处的光场分布(b)以及 xy 截面的分布(c)。偏置 80mm，总 CRL 长度为 120mm。由于光线追迹数的限制， xy 截

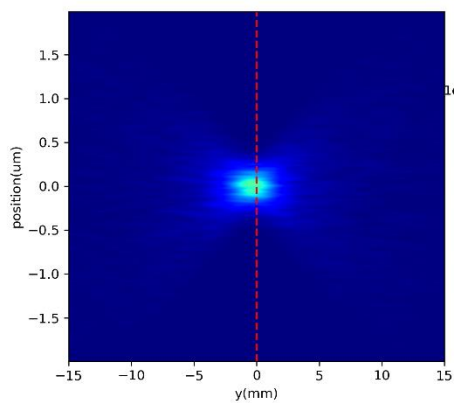
面图存在一定的毛刺，但这不影响焦点位置的判断。



(a)



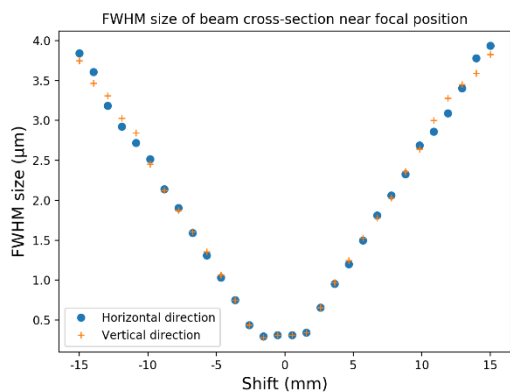
(b)



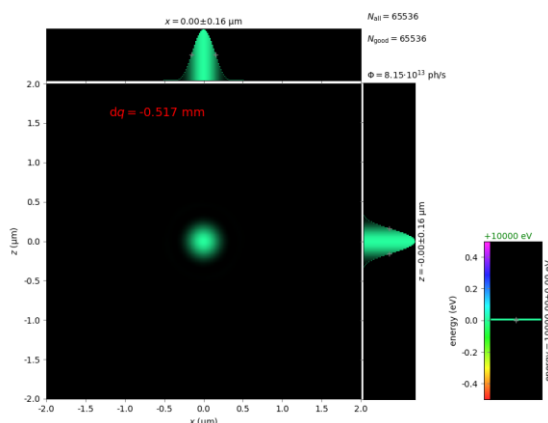
(c)

图 4-2 短焦距透镜的 XRT 几何追迹

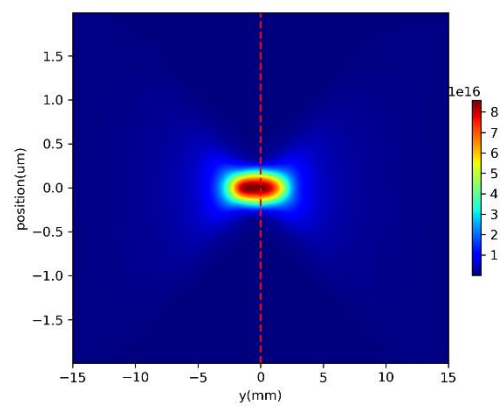
接下来，开展单电子波动追迹，结果如图 4-3 所示。



(a)



(b)

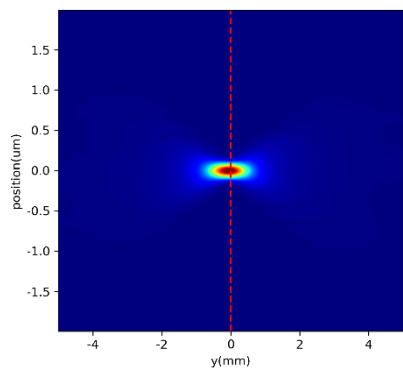


(c)

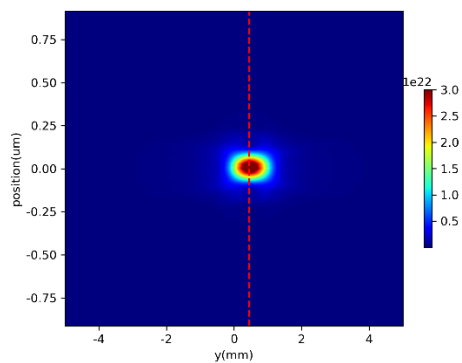
图 4-3 短焦距透镜的单电子波动传播结果

5 50 微米 CRL 聚焦仿真

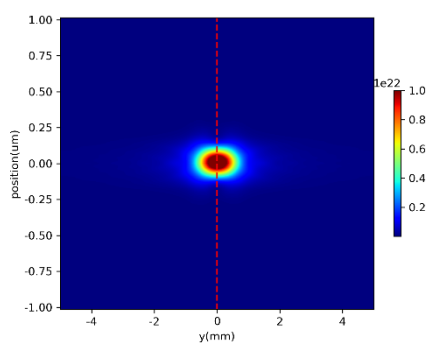
改变透镜曲率半径，观察聚焦情况。这里考虑到透镜口径为 0.5mm，所以 SRW 和 XRT 中均对口径光阑限制为 0.5mm 圆形。SRW 中的 15 组透镜焦距 0.489 m，对应的像距为 0.4945m。



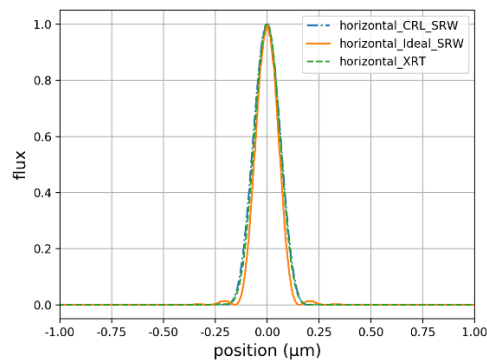
(a)



(b)



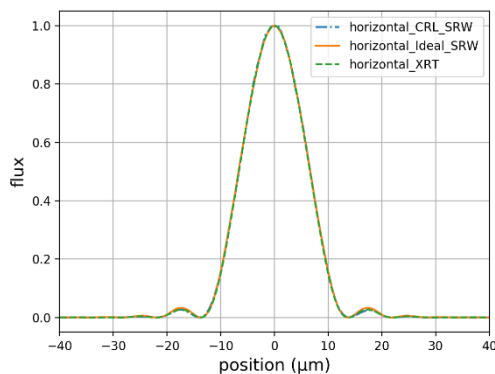
(c)



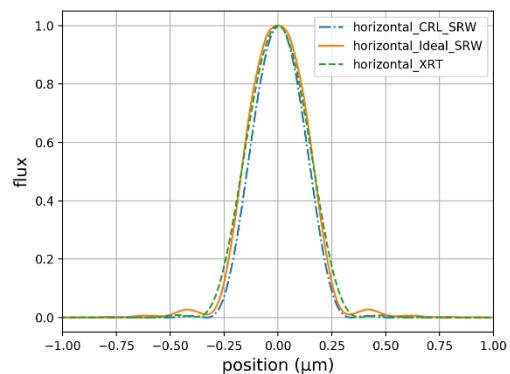
(d)

6 总结

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，如错误!未找到引用源。所示。很明显，对于长焦距，SRW 和 XRT 能获得完全一致的结果，包括 xy 截面分布也是一致的。而对于短焦距透镜，三者存在差异，与理想透镜的差异，可以认为是光学透镜的哑铃作用。



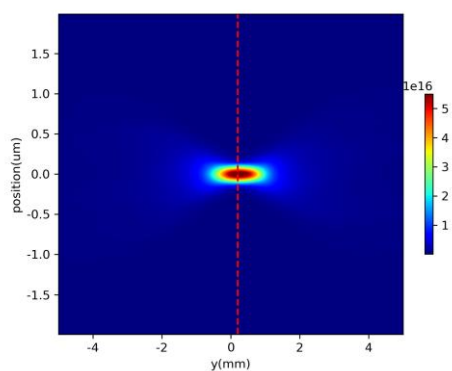
(a)



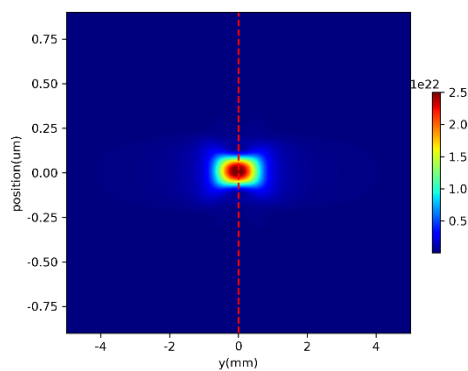
(b)

图 6-1 XRT、SRW 波动计算一维曲线对比，(a)长焦距，(b)短焦距，其中图(b)中 SRW-理想透镜和真实透镜的焦点位置分别位于 1.130m，1.1285m，

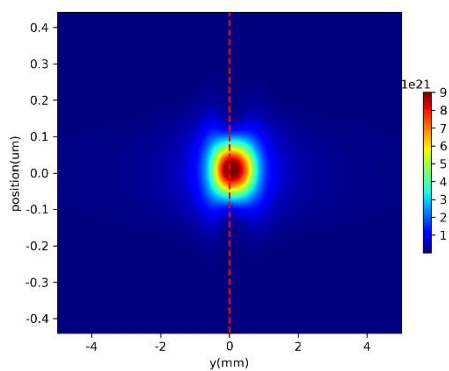
修改透镜数为 80 片，焦距为 0.505m，从计算结果来看 SRW 和 XRT 计算结果一致，说明二者的仿真方法是一致的，存在的微小差别应该来自于材料参数不完全一致。SRW 中理想透镜和真实透镜的成像位置与理论计算值一致，这比 XRT 要方便很多。



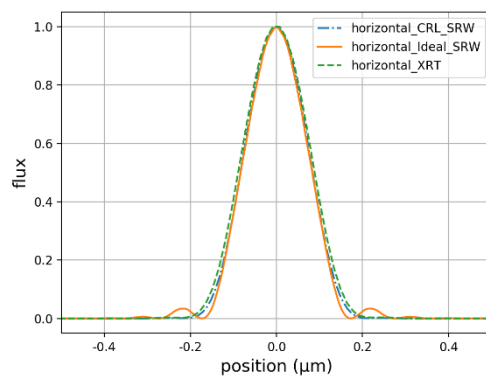
(a)



(b)



(c)



(d)

图 6-2 XRT、SRW 波动计算结果， $f=550\text{mm}$ ，分别对应 XRT、SRW 理想透镜、SRW 真实 CRL，以及三个一维曲线(d)

7 工作中的问题

(1) CRL 的有限厚度给焦点位置的确定带来了困难。