

文章编号: 1002-1582(2026)01-0123-06

三电极静电透镜构型优化超快电子脉冲聚焦仿真

李梦超*, 郭勇, 丁宁, 陈维, 黄骏, 倪维元, 王兴权
(赣南师范大学 物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 采用有限元 (PS) 联合 N-particle 粒子仿真 (GPT) 对中国科学院物理研究所 100 keV 超快电子衍射装置进行三电极静电透镜 (EL) 聚焦仿真, 通过研究不同构型静电透镜, 提出三电极静电透镜设计建议。仿真显示, 对于中间电极的中心孔, 当初始脉冲半径 0.1 毫米时, 缩小孔径可使电子脉冲聚焦至 39 微米及以下。厚度和孔径固定, 孔其两侧边缘为椭圆倒角时, 缩小平行轴 B 可使电子脉冲聚焦至 49 微米及以下; 而圆形倒角缩小倒角半径可使电子脉冲聚焦至 39 微米。仿真发现, 通常电极板厚度越薄, 聚焦效果越好, 然而孔边缘倒角半径 1 毫米时, 存在最优厚度 6 毫米, 此时电子脉冲可聚焦至 38 微米。电透镜的焦距与孔半径和孔深成正比, 与椭圆倒角的平行轴 B 或圆形倒角的半径成正比。超快电子脉冲在电透镜下的聚焦行为与电子束流具有相似性。仿真结果对静电透镜在超快电子衍射 (UED) 中的应用具有促进作用, 对超快电子脉冲光学、透射电子显微镜和扫描电子显微镜等领域也具有极强的实际应用价值。

关 键 词: 超快电子衍射技术 (UED); 直流光阴极电子枪; 粒子仿真; 电场有限元仿真; 电子光学

中图分类号: O463

文献标识码: A

Optimization of einzel lens configuration for ultrafast electron pulse focusing simulation

LI Mengchao*, GUO Yong, DING Ning, CHEN Wei, HUANG Jun, NI Weiyan, WANG Xingquan

(School of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The finite element method (Poisson Superfish) and the general particle tracer are used to simulate the einzel lens of the 100 keV ultrafast electron diffraction device in the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences. The simulation studies the focusing behavior of 100 keV ultrafast electron pulses under different configurations of electrostatic lenses, addressing the core issues in the three-electrode electrostatic lenses. Small electrode holes, small hole arc edges, and thin thickness are necessary for better focusing. For a pulse with a radius of 0.1 millimeters, it can be focused to 39 micrometers when the aperture is reduced. Small radius circular arc or small B value elliptical arc are also needed of hole edges for strong pulse focusing. The electron pulse can be focused to a diameter of 49 micrometers by reducing the B-axis of the elliptical arc of the hole. When the arc of the hole is circular, reducing its radius can focus the electron pulse to 39 micrometers. When the hole's arc radius is 1 millimeter, there exists an optimal thickness of 6 millimeters, at which the electronic pulse can be focused to 38 micrometers. The focusing behavior of ultrafast electron pulses under electric lens is similar to electron beams. These results can promote the application of electric lenses in UED. The results are also useful for the development of electron beam optics, transmission electron microscopy, and scanning electron microscopy. This article has strong practical application value.

Keywords: Ultrafast electron diffraction technology (UED); DC photocathode electron gun; particle simulation; finite element simulation of electric field; electron optics

收稿日期: 2025-09-18; 收到修改稿日期: 2025-11-18

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (GJJ201437); 国家自然科学基金资助项目 (22061002, 52067002); 江西省主要学科学术和技术带头人—领军人才项目 (20225BCJ22003)

作者简介: 李梦超 (1988—), 男, 讲师, 博士, 从事超快电子衍射技术研究。

* 通讯作者: limenchao@gnnu.edu.cn

0 引 言

超快电子衍射技术 (UED) 是一种利用超短脉冲激光实现时间分辨泵浦探测的技术, 其利用超短脉冲激光获得超短超快电子脉冲团从而实现飞秒级探测^[1-5]。射频主动压缩技术的应用进一步发展出了微波兆伏特电子枪、超导射频加速压缩的超快电子衍射技术 (MeV UED), 时间分辨率已经优于 50 飞秒^[6,7]。基于高压直流光阴极电子枪为核心的超快探测技术在验证经典理论^[8-12]、化学反应进程和表面物理研究^[13-15]、激光等离子体诊断^[16-24]等方向上均获得极大发展。基于 UED 技术的超快电子阴影成像已成为激光等离子体的诊断方案之一, 在气体团簇等离子体^[16]、金属表面喷射等离子体^[21], 材料表面电场诊断中^[22]均获得了较快的发展。由于电子空间排斥力的存在, 电子脉冲团在漂移至样品的过程中脉宽会被展宽, 径向半径也会不断增大, 导致时间和空间探测精度降低^[25,26]。脉冲展宽问题可通过主动压缩方案解决^[6], 而半径的扩大则通过传统的磁汇聚透镜对电子脉冲聚焦解决。

然而磁透镜会导致电子垂直于传播方向发生旋转, 产生螺旋路径, 不利于阴影成像。静电透镜不存在该问题, 且能够更灵活的控制电子脉冲截面, 非常适合 UED 超快电子阴影成像。静电透镜控制超快电子脉冲将是 UED 的重要发展方向之

一。虽然三电极静电透镜在电子显微镜, 电子束流等领域已经得到了广泛的研究, 然而三电极静电透镜尚未在超快电子衍射技术中得到广泛应用。三电极静电透镜 (einzellens) 的中间电极中心通孔是决定其聚焦能力的核心因素, 也是该类静电透镜的核心设计问题, 中心孔的大小、深度、边缘形状等等都会决定其聚焦能力。研究其中心孔控制超快电子脉冲的聚焦行为变得非常必要, 对促进 UED 技术的发展也具有重要意义。

1 仿真参数

仿真基于中国科学院物理研究所 100keV UED 系统^[27], 在其直流光阴极电子枪尺寸设计的基础上, 增加三电极静电透镜, 图 1 (a) 显示了电子枪联合单透镜的二维原理图, 并标注了各部件的大致位置。电子枪阳极中心开孔半径 0.1mm, 同时作单透镜入口电极 (entrance electrode), 透镜中间电极 (central electrode) 为中心开孔的金属板, 且开孔前后两侧边缘做圆形光滑倒角处理, 开孔形状如图 1 (b) 所示, 为方便描述, 边缘倒角弧由两个轴 A 和 B 决定, A 轴垂直于电极板, B 轴平行于电极板。入口电极板后表面与中间电极前表面距离为 4mm。出口电极 (Exit Electrode) 为厚度 2mm 的金属板, 其中心开通孔, 开孔半径为 0.1mm, 与入口电极相同, 出口电极前表面距离中间电极后表面为 4mm。

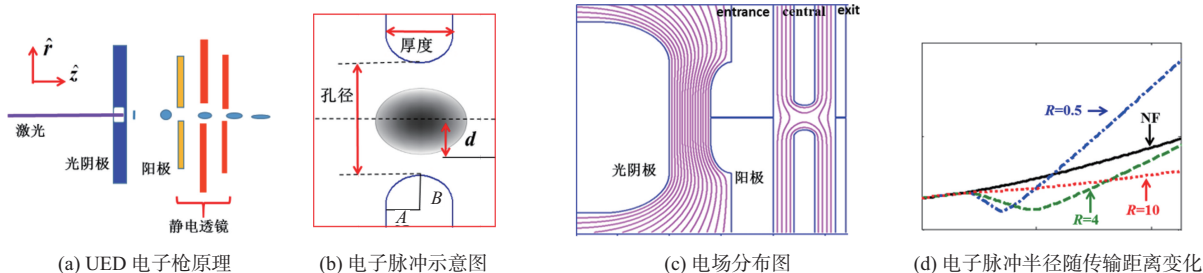


图 1 电子枪及仿真原理

图 1 (c) 为电子枪阴极接 -100kV 电压, 单透镜中间电极接 -30kV 电压时的有限元仿真结果, 图中为电势分布, 其中阳极、出口电极接地。图中电子枪各部件为真实形状, 中间电极板厚度 4mm, 其中心孔半径 4mm, 孔边缘做圆形倒角, 半径 2mm, 即轴 A 和 B 均为 2mm。其后将电场计算结果输入粒子仿真中, 观察超快电子脉冲聚焦效果。有限元仿真软件为洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 提供的二维开源软件 poisson superfish 7.17^[28]。电场仿真边界采用诺伊曼边界条件 (Neumann boundary condition), 仿真网格设置为 0.1mm。本文采用的粒子仿真软件为 General Particle Tracer 3.10^[29]。在

粒子仿真中, 电子脉冲传播方向为 z 正向, 电子脉冲径向为 xy 方向。超快电子脉冲由 50fs 的飞秒激光辐照光阴极产生, 脉冲内部电子沿半径和 z 方向均匀分布。脉冲半径设置为 0.1mm, z 方向长度通过计算约为 $2.7 \times 10^{-9} \text{m}$ 。由于需要关注单透镜结构的细微改变对聚焦特性的影响, 需尽可能减少其它干扰因素以得到直观的结果, 此处将电子脉冲的内的电子沿 xy 方向的速度统一设置为 0。阴极表面为电子脉冲运动起始位置, 阳极表面距阴极 8mm。超快电子脉冲是从阴极表面发出, 经 100kV、长度 8mm 的电场加速, 通过阳极中心开孔后进入透镜聚焦电场。由于大多数涉及直流光

阴极电子枪的超快电子衍射实验,其单发电子数量多在几千至几万范围之内,因此具有代表性的,本文采用单发电子数量1万和10万两种情况开展数值模拟。图1(d)显示了电子脉冲内电子数量10万,中间电极接 -30 kV 聚焦电压,中心开不同

孔径时电子脉冲半径随传播距离而变化的粒子仿真结果。蓝色点断线对应中心开孔半径 0.5 mm ,绿色虚线 4 mm ,红色实线 10 mm 。可以看到,透镜中间电极中心孔半径为 10 mm 时,电场已经没有聚焦效果了。

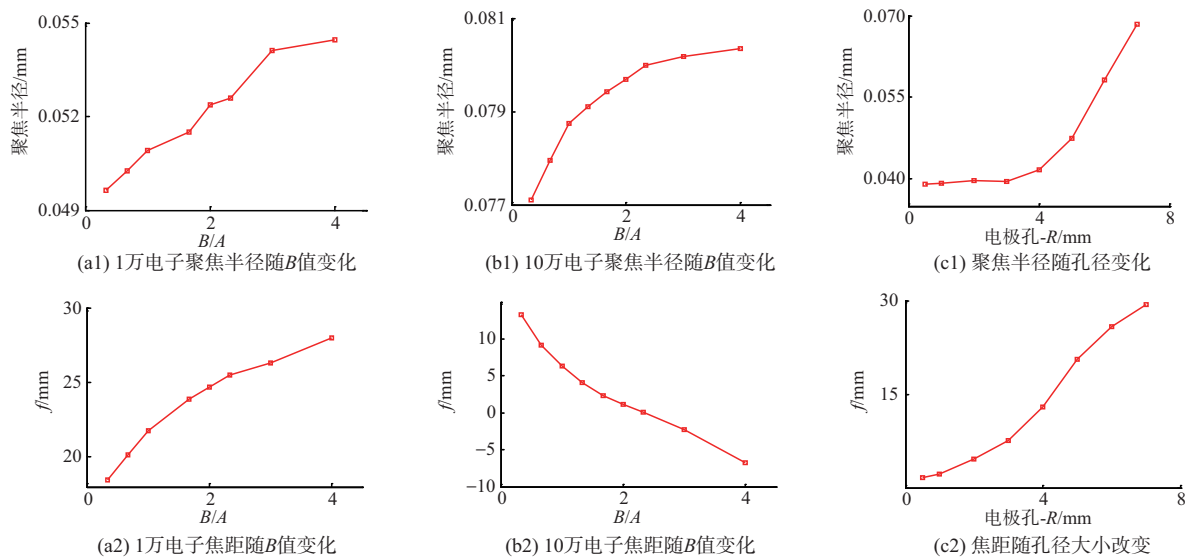


图2 改变中心孔边缘倒角形状及孔径提高聚焦能力。

2 三电极静电透镜仿真

2.1 中心孔边缘倒角形状

对于固定厚度的中间电极,垂直轴 A 为厚度的一半,取中间电极板厚度 6 mm ,对应轴 A 长 3 mm 。平行轴 B 取不同长度时,孔两侧边缘倒角弧产生变化,影响电场分布进而影响单透镜的聚焦能力,图4(a)显示了 B 轴长度为 12 mm 时中心孔处电场电位分布情况。对 -10 kV 聚焦电压下, A 轴为 3 mm , B 轴长度取 1 mm 、 2 mm 、 3 mm 、 5 mm 、 7 mm 、 9 mm 、 12 mm 时7种情况分别进行有限元仿真,将电场仿真结果输入粒子程序中进行粒子仿真,脉冲团内的电子数量设置为1万个。将每种情况下电子脉冲获得的最小半径作为聚焦半径汇总起来绘于图2(a1)中,为方便判断,横坐标为 B 轴和 A 轴之比 B/A 。可以看到,发现随着 B 轴变大,电子脉冲聚焦半径变大。当 B 轴长度取 1 mm 时,可使电子脉冲聚焦至 $49\mu\text{ m}$ 。另电子脉冲半径最小的位置为 $z_{\min}$,透镜中心位置为 z_{len} ,取 $z_{\min}$ 与 z_{len} 之间的距离作为焦距 f 。将上述7种情况的粒子仿真结果的 f 汇总于图2(a2)中,横坐标为 B/A 。可以看到随着 B 轴变大,焦距也逐渐增大。

当超快电子脉冲内电子数量过多时,例如10万个, -10 kV 的聚焦电压已经不能对电子脉冲提供足够的聚焦效果,会出现电子脉冲没来得及

汇聚便已经开始发散的情况,此时很难判断处聚焦半径及聚焦位置。当超快电子脉冲内部的电子数量为10万个时,再次对上述7种情况进行粒子仿真,将每种情况下电子脉冲获得的最小半径和焦距分别提取出来汇总于图2(b1)和(b2)中,可以看到随着 B 轴变大,电子脉冲最小半径变大,但这里的最小半径不再是聚焦半径。随着 B 轴变大,半径最小位置逐渐靠近透镜,当 B 超过 9 mm 时, f 甚至为负值,说明电子脉冲还没来得及聚焦便已经发散了。

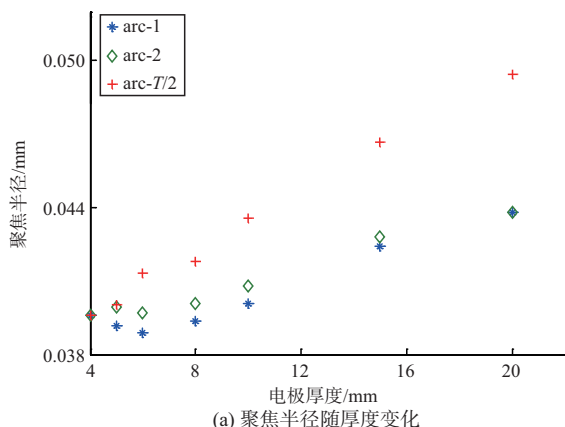
2.2 中心孔大小

由图1(d)可以看到,透镜中间电极中心孔半径为 10 mm 时,电场已经没有聚焦效果了,事实上通过仿真发现,当电子数量10万,中间电极接 -30 kV 聚焦电压时,孔半径 8 mm 时,仿真结果显示单透镜开始失去聚焦效果。因此对聚焦电压 -30 kV ,对中心通孔半径分别为 0.5 mm 、 1 mm 、 2 mm 、 3 mm 、 4 mm 、 5 mm 、 6 mm 、 7 mm 时等8种情况分别进行有限元仿真,将电场仿真结果输入粒子程序中进行粒子仿真,超快电子脉冲内电子数量设置为10万个。将电子脉冲聚焦半径和焦距 f 提取出来分别汇总于图2(c1)和(c2)中。可以看到随着中心孔半径变大,聚焦半径变大,焦距 f 也逐渐变大。即越小的通孔,聚焦效果越好,这和电子束流的相关结论相似。当中心通孔半径为 0.5 mm ,电子脉冲聚焦至半径 $39\mu\text{ m}$ 。这里值得注

意的是, 通孔半径 0.5~4mm 范围内, 电子脉冲聚焦半径相差较小, 电子脉冲聚焦效果随孔径的减小提升缓慢, 该范围可作为 UED 技术中透镜中间电极板开孔参考。

2.3 中心孔深度及圆形倒角

不同厚度的电极板, 其中心孔的深度也不一样。对聚焦电压—30kV 时, 电极板厚度取 4mm、5mm、6mm、8mm、10mm、15mm、20mm 共 7 个种情况分别进行有限元仿真, 再将电场仿真结果输入粒子程序中进行粒子仿真, 超快电子脉冲内电子数量设置为 10 万个。仿真发现, 当孔两边的



边缘为圆形倒角且倒角半径为 1mm 时, 电子脉冲聚焦半径随着电极板的厚度的增加而增大, 如图 3 (a) 中的 “*” 所示。其中横坐标为厚度, 纵坐标为聚焦半径。同时随着电极板的厚度的增加, 焦距 f 也跟着增大, 如图 3 (b) 中的 “*” 所示。当孔两侧的边缘圆形倒角半径为 2mm, 再次对上述 7 个种情况分别进行仿真, 电子脉冲的聚焦半径如图 3 (a) 中的 “◇” 所示, 焦距 3 (b) 如图 4 中的 “◇” 所示。可以看出, 孔边缘倒角半径 2mm 与倒角为 1mm 时, 聚焦半径和焦距 f 随厚度的变化趋势一致。

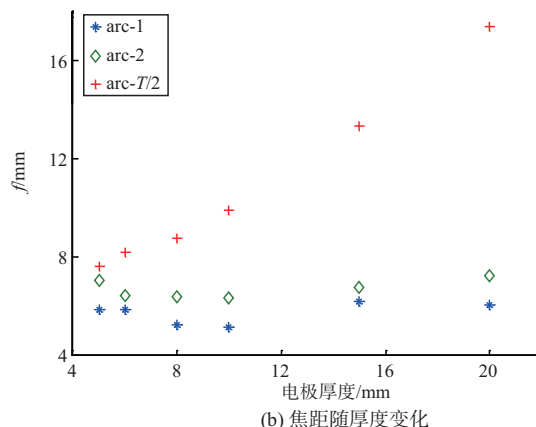


图 3 改变电极板厚度提高聚焦能力

进一步的, 取孔边缘倒角半径为电极板厚度的一半, 对上述 7 种情况再次分别进行仿真, 电子脉冲聚焦半径如图 3 (a) 中 “+” 所示, 焦距 f 如图 3 (b) 中的 “+” 所示。可以看到, 孔边缘圆形倒角半径 1mm、2mm 及电极厚度一半时, 聚焦半径和焦距 f 随厚度的变化趋势一致。对于相同厚度的电极板, 边缘倒角越小聚焦效果越强, 当倒角为厚度一半时, 此为边缘倒角能取到的最大情况, 聚焦效果也是最弱的。因此可以看出孔边缘倒角越小, 电子脉冲聚焦半径越小, 焦距越短, 单透镜聚焦效果越强, 当圆形倒角缩小倒角半径至 2 mm 时可使电子脉冲聚焦至 39 μ m。电极板厚度越薄, 聚焦半径越小, 焦距越小, 单透镜聚焦效果越强。也可以理解为, 电极板中心开孔越深, 聚焦效果越弱。然而孔边缘为 1mm 半径倒角时, 情况稍有不同, 此时存在一最优极板厚度即 6mm, 此时电子脉冲可聚焦至 38 μ m。

3 聚焦模型讨论

实际的机械加工中总会存在一定的误差, 比如, 极板的厚度公差。图 3 显示聚焦效果基本与极板的厚度成线性关系, 因此可以推测聚焦半径和焦距会随着极板厚度公差对应的进行线性增加或

减小。图 2 显示中心孔半径对聚焦半径和焦距的影响, 基本成线性关系, 因此可以推测, 实际孔径的加工时, 其误差也会线性的影响到聚焦半径和焦距。对于小孔结构, 公差的影响可能使得仿真结果与实际效果有所差别, 图 3 中的 “+” 显示出边缘倒角对电子脉冲聚焦的影响, 基本呈线性关系, 预计实际加工导致的倒角半径误差也会线性的影响到聚焦效果。对于小孔边缘倒角, 实际加工时, 由于加工方差, 不一定能够为严格的圆形倒角。此时可以借助图 2 中的椭圆形边缘倒角判断方差的影响, 图 2 显示了椭圆形倒角长短轴之比 B/A 对聚焦的影响, 大致呈线性关系, 可通过该趋势判断实际加工时边缘倒角不规则误差对聚焦的影响。

图 4 (a) 显示了 B 轴长度为 12mm 时中心孔处电场电位分布情况, 图 4 (b) 显示了中间电极板厚度 8mm, 孔两侧边缘为 2mm 圆形倒角时的电场分布情况。由于电子脉冲初始半径为 0.1mm, 且径向电场分量 E_r 对电子脉冲聚焦起主要作用, 因此可将距离中心轴 $d=0.1$ mm 位置处的径向电场分量 E_r 提取出来作为电场聚焦能力的定性判断。图 4 (c) 显示了 B 轴为 1mm、3mm、6mm、12mm 时距离中心轴 $d=0.1$ mm 处, 电场径向分量的 E_r 沿 z 轴的分布情况, 可以看到 B 轴值越小, 电场峰值部分越平

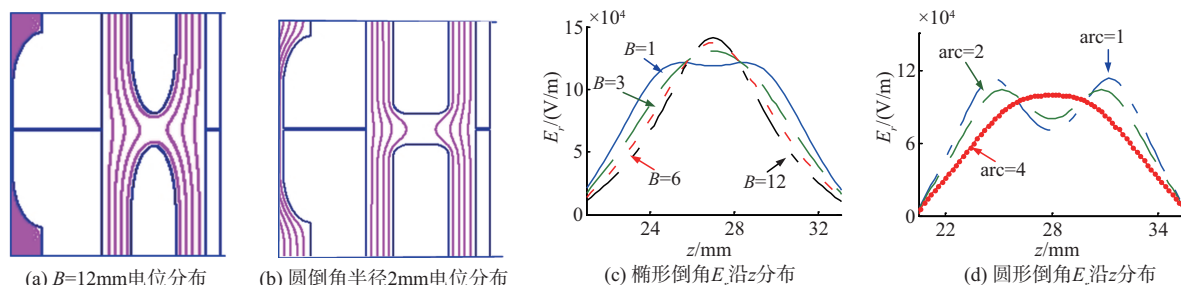


图4 聚焦电场分析

缓。图4(d)显示孔两侧边缘倒角为圆形时,倒角半径为 1mm , 2mm , 4mm 时,距离中心轴 $d=0.1\text{mm}$ 处,电场径向分量的 E_r 沿 z 轴的分布情况。

可以看到,较小的倒角半径使孔边缘附近电场分量 E_r 获得更大值。根据经典电子束流聚焦理论,结合上述电场分布可得出,越小的 B 值越有利于聚焦,越小的圆形倒角越有利于聚焦。这与上文中的超快电子脉冲的粒子仿真结果一致,可以看出超快电子脉冲关于静电场聚焦与经典电子束流理论具有一定相似性。

一些关于超快电子脉冲的空间动力学行为和调控的模型研究近些年逐渐起步,尤其一种用平均电荷场模型来描述电子脉冲的近似手段取得了非常好的效果。平均电荷场模型给出了电子脉冲径向变化的近似公式^[30],同时不同的电子密度分布需要不同形状因子^[25]进行描述。在处理阳极孔处电场径向分量对电子脉冲径向长度的影响时,增加了径向速度增量^[30]

$$\Delta v_r = \frac{r}{4d} \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$$

式中, U 为阴极与阳极间的电压; d 为阴极与阳极间的距离。关于单透镜电子脉冲平均电荷场的模型还很少被讨论。上文仿真显示,超快电子脉冲静电场聚焦与经典电子束流具有一定相似性,结合经典电子束流理论和平均电荷场模型可发展出超快电子脉冲的聚焦模型。

超快电子脉冲具有更小的尺寸,内部电子密度较大,电荷间的排斥作用强,需要更强的聚焦电压,当透镜聚焦效果强于电子发散时,超快电子脉冲关于静电场聚焦的结果与经典电子束流相似,然而当聚焦电压较小时,电场聚焦弱于电子相互排斥导致的发散,如图2(b1)(b2)所示,此时随着 B/A 增大,电子脉冲最小半径位置将会变为负值,电子脉冲还没来得及聚焦便发散了。

4 结论

对于 100keV 的超快电子脉冲,三电极静电透

镜中间电极的中心通孔越小,聚焦效果越强。在 -30kV 聚焦电压下,对于半径 0.1mm 内含10万电子的脉冲,当中心孔径为 0.5mm 时,脉冲半径聚焦至 $39\mu\text{m}$,继续缩小孔径可聚焦至更小,因此建议中间电极开孔半径小于 4mm 。对于椭圆型倒角, B/A 越小,电子脉冲聚焦半径越小,焦距越小,聚焦效果越强。在 -10kV 聚焦电压下,对于1万电子的脉冲,当 B 轴长度取 1mm 时,可使脉冲聚焦至 $49\mu\text{m}$,继续缩小 B 轴有望聚焦至更小。对于圆形倒角,倒角半径越小,其聚焦电场越强,电子脉冲聚焦效果越强。在 -30kV 聚焦电压下,单发脉冲10万电子, 2mm 半径圆形倒角可使电子脉冲聚焦至 $39\mu\text{m}$ 。电极板厚度越厚,中心孔越深,聚焦效果越弱。然而 1mm 半径边缘倒角时,情况稍有不同,此时存在一最优厚度 6mm ,此时电子脉冲可聚焦至 $38\mu\text{m}$ 。综上,要对超快电子脉冲获得一个好的聚焦效果,三电极静电透镜中间电极开孔要小;若孔两侧边缘为椭圆型倒角,则 B 值要小;若为圆形倒角,则倒角半径要小;电极板厚度要薄;以及合适的聚焦电压。上述仿真结果对于UED电子枪的设计和應用有一定的参考价值,对于超快电子脉冲聚焦的解析模型理论有一定参考价值,对电子束光学、透射电子显微镜和扫描电子显微镜的发展有一定参考价值,对其它涉及到静电场聚焦的场景也有借鉴意义。

参考文献:

- [1] Williamson S, Mourou G, J C, et al. Time-resolved, Laser-induced phase transformation in aluminum[J]. Phys. Rev. Lett, 1984, 52(26):2364—2367.
- [2] Zewail A H. Four-dimensional electron microscopy[J]. Science, 2010, 328(5975):187—193.
- [3] Gordon M, van der Geer S B, Maxson J, et al. Point-to-point Coulomb effects in high brightness photoelectron beam lines for ultrafast electron diffraction[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2021, 24(8):084202.
- [4] Lee C, Kassier G H, Miller R J D. High bunch charge low-energy electron streak diffraction[J]. Struct Dyn, 2024, 11(2):024309.
- [5] Li C, Chen K, Yu C, et al. A carbon nanotube based electron source with 0.3eV energy spread and an unconventional time

- delay[J]. *Nature Materials*, 2025, 24: 1773—1777.
- [6] Van Oudheusden T, Pasmans P L E M, Van d G S B, et al. Compression of subrelativistic space-charge-dominated electron bunches for single-shot femtosecond electron diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105(26): 264801.
- [7] Cheng Y, Zong A, Wu L, et al. Ultrafast formation of topological defects in a two-dimensional charge density wave[J]. *Nat. Phy.*, 2024, 20(1): 8.
- [8] Zhuo-ran Ma, Feng-feng Qi, Dao Xiang. Probing molecular dynamics with ultrafast electron diffraction † [J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2021, 34(1):15—29.
- [9] Danz T, Domrse T, Ropers C. Ultrafast nanoimaging of the order parameter in a structural phase transition[J]. *Science*, 2021, 371 (6527):371—374.
- [10] Xu C, Jin C, Chen Z, et al. Transient dynamics of the phase transition in VO₂ revealed by mega-electron-volt ultrafast electron diffraction[J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1):1265.
- [11] Ryabov A. &. Baum P. Electron microscopy of electromagnetic waveforms[J]. *Science*, 2016, 353(6297):374—377.
- [12] Meng Y, Zhou Y, Wang X, et al. Direct nanosecond multi-frame imaging of irreversible dynamics in 4D electron microscopy[J]. *Nano Letters*, 2024, 24(24):8.
- [13] Yang C, Pons R, Sigle W, et al. Direct observation of strong surface reconstruction in partially reduced nickelate films[J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1):378.
- [14] Chen Z, Xu C, Xie C, et al. Structural contribution to light-induced gap suppression in Ta₂NiSe₅[J]. *Phys Rev Lett.*, 2025, 135(9):096901.
- [15] Champenois E G, List N H, Ware M, et al. Femtosecond electronic and hydrogen structural dynamics in ammonia imaged with ultrafast electron diffraction[J]. *Phys Rev Lett.*, 2023, 131(14):8.
- [16] Wu J, Tang M, Zhao L, et al. Ultrafast atomic view of laser-induced melting and breathing motion of metallic liquid clusters with MeV ultrafast electron diffraction[J]. *Proc Natl Acad Sci.*, 2022, 119(4):e2111949119.
- [17] Zhu P, Zhang Z, Chen L, et al. Four-dimensional imaging of the initial stage of fast evolving plasmas[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(21):155.
- [18] Koutensk P, Streshkova N L, Moriov K, et al. Ultrafast 4D Scanning transmission electron microscopy for imaging of localized optical fields[J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(8):4452—4459.
- [19] Sun S, Sun X, Bartles D, et al. Direct imaging of plasma waves using ultrafast electron microscopy[J]. *Structural Dynamics*, 2020, 7(6):064301.
- [20] Liu H, Gage T E, Singh P, et al. Visualization of plasmonic couplings using ultrafast electron microscopy[J]. *Nano Lett.*, 2021, 21(13):5842—5849.
- [21] Schrder A, Wendeln A, Weber J T, et al. Laser-driven cold-field emission source for ultrafast transmission electron microscopy[J]. *Ultramicroscopy*, 2025, 275:114158.
- [22] Long, C. et al. Mapping transient electric fields with picosecond electron bunches[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2015, 112(47):14479—14483.
- [23] Gage T, Durham D, Liu H, et al. Nanosecond electron imaging of transient electric fields and material response[J] arXiv preprint arXiv:2306.01171, 2023.
- [24] Dahan, R. et al. Charge dynamics electron microscopy: nanoscale imaging of femtosecond plasma dynamics[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(4):3657—3665.
- [25] Reed B W. Femtosecond electron pulse propagation for ultrafast electron diffraction[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 100(3):034916-034916-16.
- [26] Li M C, et al. Improved method for studying the propagation dynamics of ultrafast electron pulses based on mean-field models[J]. *Chin. Phys. B.*, 2017, 26(5), 130—136.
- [27] 李梦超. 百千伏超快电子衍射系统的研发[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2017.
- Li Mengchao. Development of 100KeV ultrafast electron diffraction system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [28] Posision Superfish, [EB/OL].: <https://lss.fnal.gov/uspas/resources/downloads.shtml>.
- [29] Pulsar Physics and the General Particle Tracer (GPT) code, [EB/OL]. <http://www.pulsar.nl/gpt/>.
- [30] Collin S, Merano M, Gatri M, et al. Transverse and longitudinal space-charge-induced broadenings of ultrafast electron packets[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(9):94910.