

文章编号: 1002-1582(2025)04-0456-06

UED 电子枪磁场屏蔽板设计仿真

李梦超^{1*}, 张璐², 费林博², 陈维¹, 黄骏¹, 倪维元¹, 王兴权¹

(1. 赣南师范大学 物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000)

(2. 聊城二中附属东苑中学, 山东 聊城 252000)

摘 要: 采用 Poisson Superfish 联合 General Particle Tracer 仿真 UED 直流光阴极电子枪安装不同磁场屏蔽板后的效果。发现磁屏蔽板中心开孔越小, 磁场屏蔽效果越好, 被屏蔽后的磁场大小与开孔半径成正比。然而当孔太小时, 继续减小孔径对屏蔽效果提升不明显。磁屏蔽板厚度越厚, 屏蔽效果越好, 被屏蔽后的磁场大小与厚度成反比, 但厚度变化对屏蔽的提升有限。磁屏蔽板距离电子枪越近, 电子枪磁场越大, 被屏蔽后的磁场大小与距离成反比, 这主要是中心开孔的漏磁导致。磁屏蔽板的存在会导致电子脉冲聚焦提前, 聚焦半径变小。电子脉冲聚焦半径和焦距随磁屏蔽板中心孔半径变小而变小, 同时随着磁屏蔽板厚度增大而变小。电子脉冲聚焦半径和焦距随磁屏蔽板距离电子枪的距离的增大而变小。总之, 磁场屏蔽效果越好, 电子枪和磁屏蔽之间的磁场越小, 电子脉冲聚焦半径和焦距越小。

关 键 词: 超快电子衍射 (UED); 直流光阴极电子枪; 超快电子脉冲粒子仿真; 磁场有限元仿真; 磁场屏蔽
中图分类号: O463 **文献标识码:** A

Simulation of magnetic field shielding plate design for UED electron gun

LI Mengchao^{1*}, ZHANG Lu², FEI Linbo², CHEN Wei¹,

HUANG Jun¹, NI WeiYuan¹, WANG Xingquan¹

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

(2. Dongyuan Middle School affiliated to Liaocheng No. 2 Middle School, Liaocheng, 252000, China)

Abstract: Poisson Superfish and General Particle Tracer were used to simulate UED DC photocathode electron guns with different magnetic shielding plates. The smaller the center hole of the magnetic shielding plate, the better the magnetic field shielding. The shielded magnetic field is proportional to the aperture radius. Continuing to reduce the hole does not significantly improve shielding, while the central hole is too small. The thicker the magnetic shielding plate, the better the shielding effect, but the improvement is not significant. The shielded magnetic field is inversely proportional to its thickness. The closer the magnetic shielding to the electron gun, the larger the field in the gun, which mainly due to magnetic leakage from the central hole. The shielded magnetic field is inversely proportional to the distance from the cathode. The installation of magnetic shielding plates leads to premature focusing of electronic pulses and a smaller focusing radius. The smaller the center hole in the magnetic shielding plate, the smaller the focusing radius and focal length. The thicker the magnetic shielding plate, the smaller the focusing radius and focal length. The farther the magnetic shielding plate to the electron gun, the smaller the focusing radius and focal length. The better the magnetic field shielding, the smaller the magnetic field between the electron gun and the magnetic shielding, and the smaller the electron pulse focusing radius and focal length.

收稿日期: 2025-02-20; 收到修改稿日期: 2025-04-03

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: limengchao@gnnu.edu.cn

Keywords: Ultrafast Electron Diffraction (UED); direct current photocathode electron gun; Ultrafast electronic pulse particle simulation; finite element simulation of magnetic field; magnetic field shield

0 引言

超快电子衍射技术 (Ultrafast Electron Diffraction, 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, 其原理为利用分光装置将激光分束, 一束激发电子枪阴极产生探针电子, 另一束激发反应区, 控制激光光程, 使探针电子提前或延迟诊断反应区, 探测精度可至飞秒甚至阿秒。该技术并不限于衍射, 之所以称为超快电子衍射技术, 是沿用了其最初的名称。关于该技术比较早的记录是 Mourou 和 Williamson, 他们改进的条纹相机获得了 100 皮秒脉宽的电子脉冲^[1]。诺贝尔化学奖获得者 A.H.Zewail 改进电子枪设计, 将时间分辨率提高到皮秒, 首次观察到了化学键的断裂过程^[2,3], 并先后研制了多种 UED 系统。加拿大多伦多大学 Miller 等利用紧凑构型电子枪获得了 600 飞秒脉宽的电子脉冲^[4], 同时佛罗里达州立大学的曹建明等也将 UED 技术的时间分辨率提高到亚飞秒^[5]。射频主动压缩技术的应用使该技术获得了百飞秒以下的分辨率^[6], 进一步出现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^[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]、化学反应进程研究^[4,13]、表面物理^[14]、激光等离子体诊断^[15-21]等方向上均获得极大发展。

直流光阴极电子枪做为 UED 系统的电子源, 是该技术的核心部分之一, 研究和改进电子枪的工作特性一直是 UED 研究中的主要方向之一。为屏蔽外界干扰, 尤其是屏蔽磁场对超快电子脉冲的影响, 通常在电子枪顶部安装磁屏蔽板。本文仿真针对中国科学院物理研究所 100keV UED 系统^[22]上的直流光阴极电子枪, 在电子枪顶部安装磁屏蔽板, 其结构如图 1 (a) 和 (b) 中所示。磁屏蔽板可以防止外部磁场及 UED 本身磁场的影响, 良好的磁屏蔽板设计可以防止电子脉冲路径受到干扰, 保证电子脉冲顺利通过阳极孔, 防止电子脉冲空间畸变, 能保证电子脉冲质量和内部电子数量, 确保电子分布。在实际应用中, 磁场屏蔽板并不能完全消除磁场的影响, 只能减小或隔离磁场的干扰。例如磁屏蔽板中心需开通孔以确保电子脉冲通过, 通孔位置如图 1 (a) 和 1 (b) 中

显示, 通孔的存在便会导致漏磁。同时磁屏蔽后电子枪周围空间的磁场也会漏入。同时磁场屏蔽效果还受多种因素的影响, 例如磁屏蔽板厚度、安装位置等等。当开启磁透镜时, 磁屏蔽板的存在也会影响到磁透镜对电子脉冲的聚焦, 主要表现为聚焦焦距缩短和聚焦半径减小, 因此磁屏蔽板下电子脉冲的聚焦动力学行为也需要作为电子枪设计的参考。采用 Poisson Superfish^[23,24]联合 General Particle Tracer^[25]仿真电子枪安装不同磁场屏蔽板后的效果, 具体为采用有限元分析方法仿真不同磁屏蔽板下的磁场分布, 然后结合粒子仿真, 观察超快电子脉冲的动力学行为。本文通过对磁屏蔽板中心开孔、厚度、安装位置等进行仿真, 找出最适合的孔径、厚度及最佳的安装位置。同时通过对磁屏蔽板屏蔽下的电子脉冲的聚焦动力学行为仿真, 为相应的 UED 实验判断电子脉冲聚焦提供参考。

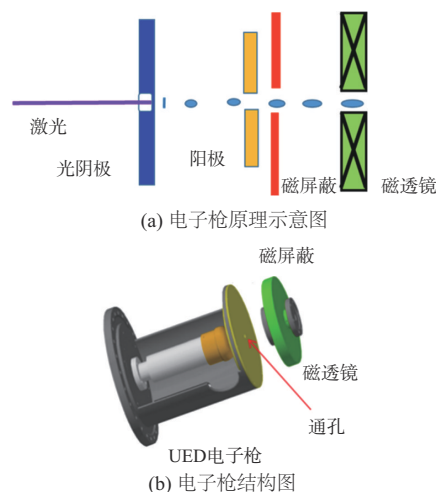


图1 电子枪示意图

1 磁场仿真

1.1 仿真参数

图 1 (a) 显示了直流光阴极电子枪的二维原理图, 图中标注了各部件的大致位置, 图 1 (b) 为中国科学院物理研究所 100keV UED 系统直流光阴极电子枪结构图, 标出了磁屏蔽板和磁汇聚透镜的位置, 图中箭头所指为磁屏蔽板中心开孔。磁汇聚透镜由直径 1mm 纯铜漆包线绕制而成, 共 52 层, 每层 20 匝, 绕制成内径 13mm、外径 80mm 的空心圆柱结构, 工作时磁透镜上的电流为 3.5A。磁屏蔽板为坡莫合金 (铁镍合金) 材

质, 仿真时相对磁导率取为 200000。腔体及电子枪的材质均为不锈钢 SUS304。不锈钢 SUS304 有较好的抗磁效果, 其磁导率与真空接近, 仿真时设置其相对磁导率为 1.04。

由于电子枪为圆柱旋转对称结构, 因此仿真其平面结构的一半, 将该结果进行柱旋转对称处理便可衍生出三维结果。图 2 (a) 显示了没有安装磁屏蔽板时磁汇聚透镜工作时磁场分布情况, 图中箭头方向对应磁场方向, 箭头越大, 表明该

处磁场越强。图 2 (b) 为安装有磁屏蔽板时的磁场分布。磁屏蔽板厚度为 3mm, 中心通孔半径 4mm。可以看到磁屏蔽板内磁感线密集, 而磁屏蔽板与电子枪之间的空间中, 磁感线密度明显下降, 磁场大为减弱。可利用磁路定理解释, 磁屏蔽板与其后的空间为并联磁路, 由于磁屏蔽板具有较高的磁导率, 其磁阻非常低, 因此其内部的磁通量远大于其后的电子枪所在空间, 磁场主要聚集在磁屏蔽板中, 实现了对其后电子枪的屏蔽。

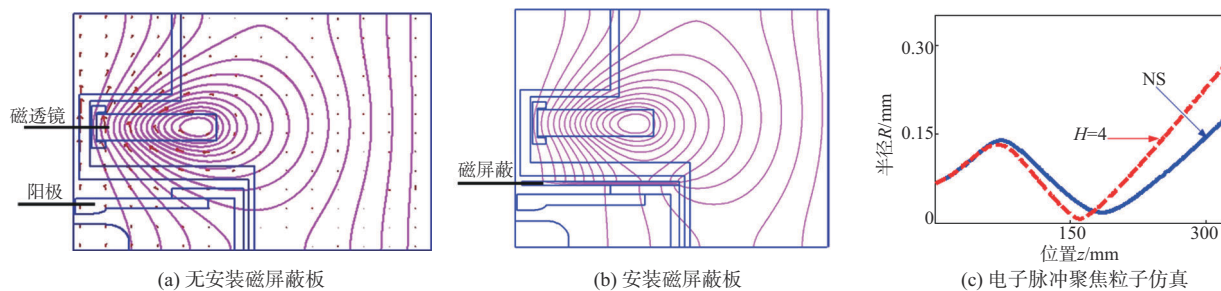


图 2 磁场分布及电子脉冲聚焦

将上述磁场结果输入粒子仿真软件后, 仿真磁屏蔽板对超快电子脉冲聚焦行为的影响。其中电子脉冲传播方向为 z 正方向, 径向截面与 xy 平面平行。电子脉冲初始半径为 $100\mu\text{m}$, z 方向长度约为 $2.7 \times 10^{-9}\text{m}$, 其内部电子数量为 10 万个, 电子密度沿半径高斯分布, 沿 z 方向均匀分布, 电子能量 xy 方向取 $0 \sim 0.1\text{eV}$ 随机分配的均匀分布, z 方向取方差 0.1eV 、平均值为 0 的高斯分布。 z 向长度是取电子枪 100kV 电压、50fs 超快激光激发后获得的电子脉冲长度^[26]。阴极表面位置设为 $z=0\text{mm}$, 阳极表面为 $z=8\text{mm}$, 磁屏蔽板中心为 $z=27\text{mm}$, 磁汇聚透镜中心为 $z=74\text{mm}$ 。电子脉冲从阴极表面出发, 经阴极和阳极间的 100kV 电压加速, 穿过磁屏蔽板, 后被磁场聚焦。图 2 (c) 显示了有无磁屏蔽板的情况下电子脉冲半径随传播方向 z 变化的仿真结果, 其中 NS (No Shield) 为图 2 (a) 没有磁屏蔽的情况, $H=4$ 为图 2 (b) 有磁屏蔽且中心开孔半径 4mm 的情况。可以看到, 磁屏蔽板的存在使电子脉冲聚焦提前, 且获得了更小的聚焦半径。

1.2 中心通孔大小

磁屏蔽板中心通孔大小会影响磁屏蔽效果, 因此针对不同半径通孔下的磁场分布进行仿真, 将沿电子枪中心 z 轴上的磁场取出统一绘制于图 3 (a1) 中, 横坐标的起始为阴极表面 $z=0$ 。在图中标出了磁屏蔽板的位置。图中蓝色实线为没有磁屏蔽板, 绿色虚线为磁屏蔽板中心通孔半径 1mm,

标记为 $H=1\text{mm}$ 。同时红色点线为孔半径 4mm, 黑色点断线为 10mm, 紫色点线为 50mm。可以看到磁场经过磁屏蔽板后迅速下降, 可以看出通孔半径越小, 磁屏蔽的效果越好。当通孔半径为 50mm 时, 屏蔽效果已经很弱, 接近没有屏蔽的情况。

对通孔半径为 1mm、2mm、4mm、10mm、20mm、50mm 时的仿真结果进行处理, 将各种半径下电子枪阴极表面中心点位置处的磁场汇总于图 3 (a2) 中, 可以看出通孔半径越小, 电子枪阴极表面处磁场越小, 表明磁屏蔽效果越好。通孔半径在 4mm 以下时, 电子枪阴极表面处磁场变化趋势变缓, 此时磁场强度维持在 $3 \times 10^{-3}\text{T}$ 左右, 继续缩小孔径, 磁场屏蔽提升效果变缓。结合图 3 (a1) 中孔等于 1mm 的情况, 此时紧挨着磁屏蔽板后的位置出现一个极小值, 比阴极上的磁场都要低, 这是由于阴极距离磁屏蔽板较远, 孔变小对阴极的影响变弱, 此时阴极磁场主要来源于电子枪侧面没有屏蔽的空间, 这也是继续缩小孔径, 阴极处的屏蔽效果渐渐不受影响的原因。

1.3 磁屏蔽板厚度

针对不同磁屏蔽板厚度的情况进行仿真, 相同的, 将沿电子枪中心 z 轴上的磁场取出, 统一绘制于图 3 (b1) 中, 横坐标的起始位置为阴极表面 ($z=0$)。绿色虚线为磁屏蔽板厚度 $T=0.5\text{mm}$ 时, 红色点线为厚度 3mm, 黑色点断线为 10mm, 紫色点线为 20mm, 蓝色实线为没有磁屏蔽的情况。磁

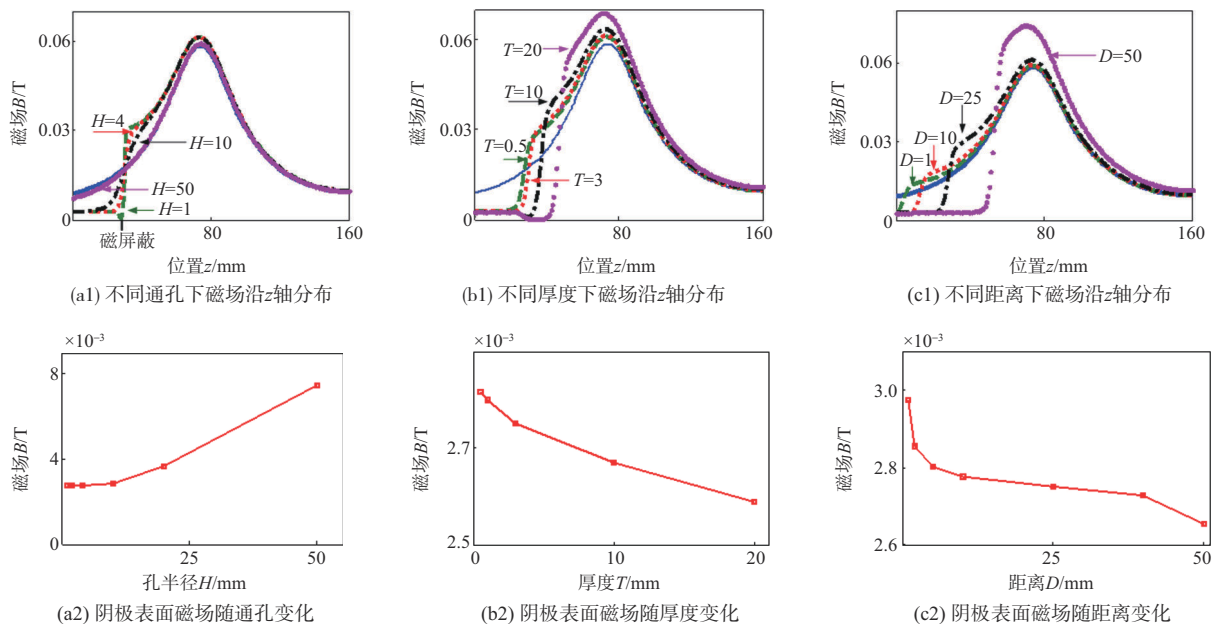


图3 磁场仿真结果

屏蔽板通孔半径不变, 均为4mm。可以看到磁屏蔽板厚度越大, 屏蔽效果越好。

为进一步判断磁屏蔽厚度对磁场的影响, 将磁屏蔽板厚度为0.5mm、1mm、3mm、10mm、20mm时的仿真结果种电子枪阴极表面中心处磁场取出, 汇总于图3(b2)中, 可以看出该处的磁场随着磁屏蔽板的厚度增大而减小, 厚度越大, 磁屏蔽效果越好, 基本呈线性关系。然而总的磁场变化范围很小, 当厚度由1mm增加至20mm时, 磁场从 2.8×10^{-3} T降至 2.5×10^{-3} T, 表明厚度变化对磁场屏蔽效果的提升有限。

1.4 磁屏蔽板与电子枪距离

当磁屏蔽板中心的通孔半径比较大时, 磁场会通过孔漏至磁屏蔽与电子枪之间的空间内。可以判断磁屏蔽距离电子枪越近, 中心通孔漏出的磁场越多, 屏蔽效果越受影响。这里取磁屏蔽板底部表面距电子枪阴极表面的距离 D (distance) 作为参数, 对不同距离进行仿真, 通孔保持4mm半径不变。将沿电子枪中心 z 轴上的磁场取出, 绘制于图3(c1)中。图中绿色虚线为距离1mm, 红色点线为10mm, 黑色点断线为25mm, 紫色点线为50mm, 而蓝色实线为没有磁屏蔽的情况。不同距离下的磁屏蔽板均具有一定的屏蔽效果。

为进一步判断距离对磁场屏蔽的影响, 将距离为1mm、2mm、5mm、10mm、25mm、50mm的仿真结果进行处理, 取出电子枪阴极表面中心处磁场, 汇总于图3(c2)中。可以看出磁屏蔽距离阴极越近, 阴极表面磁场越大, 距离越远, 磁场越小, 磁屏蔽效果越好。然而磁场的变化范围从

3×10^{-3} T降低至 2.6×10^{-3} T, 变化较少, 表明距离变化对屏蔽效果的提升有限。此时要注意, 如果通孔比较小, 例如图3(a1)所示的半径1mm, 磁屏蔽与电子枪空间里紧挨着磁屏蔽位置处的磁场有一个极小值, 此时的漏磁是很小的, 此时距离与阴极表面磁场的关系将会和图3(c2)不同, 当磁场屏蔽板距离阴极很近时, 此时阴极表面的磁场反而将会变小。

2 电子脉冲仿真

2.1 中心通孔大小

为判断磁屏蔽板中心通孔尺寸对电子脉冲聚集行为的影响, 将通孔半径为1mm、2mm、4mm、10mm、20mm、50mm时的磁场仿真结果输入粒子仿真程序中, 观察电子脉冲的聚焦行为, 提取仿真结果中的电子脉冲聚焦半径, 汇总于图4(a1)中。由于磁屏蔽会导致电子脉冲聚焦半径减小, 为方便对比, 取有屏蔽和无屏蔽下电子聚焦半径之比的百分数 (Percent) 作为图4(a1)的纵坐标, 横坐标为通孔半径。可以看到, 磁屏蔽板中心开孔越小, 其聚焦半径越小, 通孔半径2mm时, 聚焦半径减小至没有磁屏蔽时的40%左右, 然而通孔半径1mm的情况出现例外。这里原因可能是通孔半径1mm及以下时, 磁场极小值出现在紧挨磁屏蔽板后, 聚焦结果受到影响。同时提取仿真结果中的电子脉冲聚焦半径, 汇总于图4(a2)中, 其中纵坐标为焦距 f , 横坐标为孔半径, 可以看到聚焦焦距随通孔半径的减小而减小, 近似线性关系。

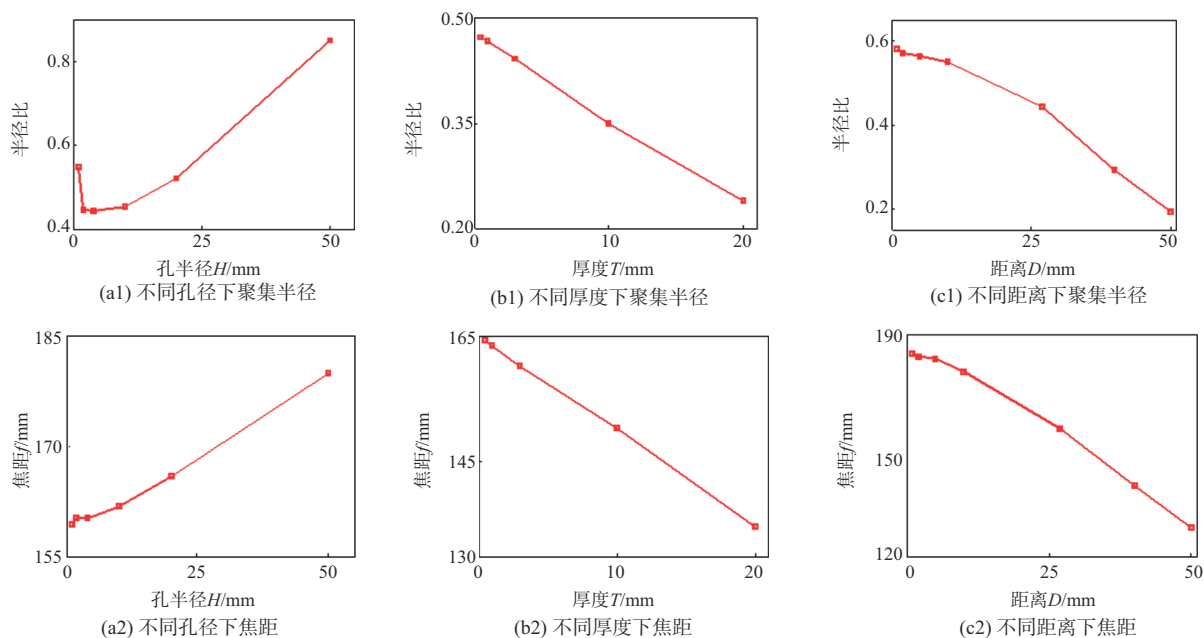


图4 粒子仿真结果

2.2 磁屏蔽板厚度

为判断磁屏蔽板厚度对电子脉冲聚焦行为的影响,将厚度为0.5mm、1mm、3mm、10mm、20mm时的磁场仿真结果输入粒子仿真中,观察电子脉冲的聚焦行为,提取粒子仿真结果中的电子脉冲聚焦半径,汇总于图4(b1)中。如上,将有磁屏蔽板和无磁屏蔽板的电子聚焦半径之比做为纵坐标,磁屏蔽板厚度做为横坐标。可以看到磁屏蔽板厚度越大,其聚焦半径越小,当磁屏蔽厚度20mm时,其聚焦半径接近没有磁屏蔽情况时的20%。提取各粒子仿真结果中的电子脉冲聚焦焦距,汇总于图4(b2)中,其中纵坐标为焦距 f ,横坐标为厚度。可以看出聚焦焦距随厚度的增加而减小,近似线性关系。

2.3 磁屏蔽板与电子枪距离

为判断磁屏蔽板与电子枪距离对电子脉冲聚焦行为的影响,将距离为1mm、2mm、5mm、10mm、25mm、50mm的磁场结果输入粒子仿真中,观察电子脉冲的聚焦行为,提取各粒子仿真结果中的电子脉冲聚焦半径,汇总于图4(c1)中,其中纵坐标为焦距 f ,横坐标为距离。可以看到,电子脉冲聚焦焦距随距离的增加而减小,近似线性关系。

3 结 论

本文通过对磁屏蔽板中心开孔、厚度、安装位置等进行仿真,找出了最适合的孔径、厚度及安装位置。发现磁屏蔽板中心开孔半径越小,屏

蔽效果越好,然而小于4mm时,半径的缩小带来的屏蔽提升不明显,因此开孔半径建议小于4mm,且越小越好,但追求过小的孔径不是必要的。发现磁屏蔽板厚度越大,屏蔽效果越好,但厚度对屏蔽提升有限,因此磁屏蔽板的厚度宜厚,如设计需要也可适当选择薄一些的厚度,屏蔽不会有大的降低。发现磁屏蔽板位置距离阴极越远,电子枪阴极处的磁场越小,这是由于中心通孔处会有漏磁,离阴极越远,漏磁的影响越小,因此当中心通孔较大漏磁较多时,磁屏蔽板宜远离电子枪。然而通孔半径小于1mm时,漏磁很小,已经不是主要因素,电子枪处的磁场主要是周边空间的磁场扩散而来,此时磁屏蔽板位置不需要远离电子枪。

综上,对于较大直径的电子脉冲,磁屏蔽开孔半径需小于4mm,且远离电子枪。若电子脉冲直径较小,磁屏蔽中心开孔半径需小于1mm,此时不用考虑孔的漏磁,磁屏蔽位置没有特殊要求。磁屏蔽的厚度可以适当的取在1~5mm的范围。磁屏蔽板的存在会导致电子脉冲聚焦提前,聚焦半径变小。粒子仿真显示,脉冲聚焦半径及焦距和电子枪处的磁场成正比,即越好的磁场屏蔽效果,对电子脉冲的聚焦越有利。上述磁场仿真结果对于UED电子枪的设计和有一定的参考价值,对其它磁场屏蔽场景也有借鉴意义,上述粒子仿真结果可作为UED实验中电子脉冲聚焦的参考。

参考文献:

- [1] Williamson S, Mourou G, J C and Li M. Time-resolved,

- Laser-Induced phase transformation in aluminum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 52(26): 2364—2367.
- [2] Zewail A H , Thomas J M . 4D electron microscopy : imaging in space and time[M]. London: Imperial College Press, 2009:1—350
- [3] Zewail A H. Four-dimensional electron microscopy[J] . *Science*, 2010, 328(5975):187—193..
- [4] Siwick B J, Dwyer J R, Jordan R E, et al. Femtosecond electron diffraction studies of strongly driven structural phase transitions[J]. *Chemical Physics*, 2004, 299(2-3):285—305.
- [5] Cao J, Hao Z, Park H, et al. Femtosecond electron diffraction for direct measurement of ultrafast atomic motions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(5):1044—1046.
- [6] Oudheusden T V, Pasmans P L E M, Geer S B V D, et al. Compression of subrelativistic space-charge-dominated electron bunches for single-shot femtosecond electron diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 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):54—60.
- [8] Siwick B J, Dwyer, J R, Jordan R E. et al. An atomic-level view of melting using femtosecond electron diffraction[J]. *Science*, 2003, 302:1382—1385.
- [9] Ebrahim, et al. Ultrafast dynamics. Four-dimensional imaging of carrier interface dynamics in p-n junctions[J]. *Science*, 2015, 347:164—167 .
- [10] Kealhofer C , Schneider W , Ehberger D, et al. All-optical control and metrology of electron pulses[J]. *Science*, 2016, 352(6284):429.
- [11] Ryabov A. & Baum P . Electron microscopy of electromagnetic waveforms[J]. *Science*, 2016, 353(6297):374—377.
- [12] Ropers C. Ultrafast optics. electrons catch a terahertz wave[J]. *Science*, 2016, 352(6284):410—411..
- [13] Yang C , Pons R , Sigle W , et al. Direct observation of strong surface reconstruction in partially reduced nickelate films[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1):378.
- [14] Duan S, Cheng Y, Xia W, et al. Optical manipulation of electronic dimensionality in a quantum material[J]. *Nature*. 2021, 595:239.
- [15] Gao W, Addiego C, Wang H, et al. Real-space charge-density imaging with sub-ngstrom resolution by four-dimensional electron microscopy[J]. *Nature*, 2019, 575(7783):1—1.
- [16] Centurion M, Reckenthaeler P, Trushin S A, et al. Picosecond electron deflectometry of optical-field ionized plasmas[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(5):161—163.
- [17] Zhu P, Zhang Z, Chen L, et al. Four-dimensional imaging of the initial stage of fast evolving plasmas[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(21):155.
- [18] Li J , Wang X , Chen Z , et al. Ultrafast electron beam imaging of femtosecond laser-induced plasma dynamics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(8):2023.
- [19] Park H, Hao Z, Wang X, et al. Synchronization of femtosecond laser and electron pulses with subpicosecond precision[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(8):083905.
- [20] Zhou J, Correa A A, Li J, et al. Dynamics of charge clouds ejected from laser-induced warm dense gold nanofilms[J]. *Phys. rev. e*, 2014, 90(4):041102.
- [21] Chen L, Li R, Chen J, et al. Mapping transient electric fields with picosecond electron bunches[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 112(47):14479—14483.
- [22] 李梦超. 百千伏超快电子衍射系统的研发[D]. 中国科学院大学(中国科学院物理研究所). 2017.
- Li M. C. Development of 100KeV ultrafast electron diffraction system[D]. Doctoral dissertation, (University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [23] Yabe T. Computer simulation technology[J]. *Journal of Plasma & Fusion Research*, 1994, 70(12):1269—1273
- [24] Posision Superfish, [EB/OL].: <https://lss.fnal.gov/uspas/resources/downloads.shtml>.
- [25] "Pulsar Physics and the General Particle Tracer (GPT) code", [EB/OL]. <http://www.pulsar.nl/gpt/>.
- [26] Li Mengchao, Wang Xuan, Liao Guoqian, 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): 054103.