

# 基于 Geant4-CST 联合仿真的条纹变像管光电子产生与控制

廖宇翔, 王子辰, 唐林, 冯俞铭, 赵小艳, 刘颀威, 张开春\*

电子科技大学电子科学与工程学院太赫兹中心, 四川 成都 611731

**摘要** 碘化铯(CsI)光电阴极广泛应用于超快诊断中,光电子的空间分布、能量分布、时间分布等与条纹变像管的整体性能有着密切的关联。本文联合粒子仿真软件 Geant4 和三维电磁软件 CST 实现了对 CsI 光电阴极的光电子产生与控制过程的全动态模拟。采用 Geant4 软件对 CsI 光电阴极的光电转换过程进行建模,分析了二次电子出射能量、时间、位置、角度等发射特性;通过数据交互,统计了出射光电子的分布规律,然后将其应用于 CST 中建立阴极发射模型,并在 CST 中设计出一款弧矢、子午方向上放大倍率皆为 2 的各向异性聚焦条纹变像管。

**关键词** X 射线光学; Geant4; 联合仿真; 碘化铯; 光电发射特性; 各向异性聚焦条纹变像管

**中图分类号** O436; TN143

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231488

## 1 引言

对于持续时间在  $1\ \mu\text{s}$  以下的超快现象,需要超快诊断技术对其进行区分、记录和分析,这种技术通常具有超高时空分辨率、高探测灵敏度、大动态范围以及宽光谱响应范围,条纹相机等即是一种常见的超快诊断仪器<sup>[1-5]</sup>。

惯性约束聚变(ICF)<sup>[6-9]</sup>是实现核聚变的一种方式。ICF 实验中,靶丸会向外辐射大量 X 射线,通过研究 X 射线的时空特性可以进而分析核聚变过程。需要注意的是,核聚变持续时间极短(纳秒到皮秒量级),因此具有超高时空分辨能力和光强分辨能力的条纹相机,是目前 ICF 实验中主要的 X 射线探测、诊断设备之一。

目前,还没有一款软件能够完整地仿真计算光电阴极光电子的产生、轨迹跟踪以及在电子光学系统中的传输特性。通常情况下,需要采用蒙特卡罗方法研究、分析和仿真光电子的产生;采用电磁软件模拟电子束在特定电子光学系统中的传输、聚焦等。在进行电子光学系统设计时,光学模拟软件 SIMION 3D 需要用户编程导入电子源数据<sup>[10]</sup>;基于 Matlab 中数值模拟的理论模型研究结果验证较为困难,需要辅以数值模拟或实验验证<sup>[11]</sup>;而在 Lorentz-3EM 中基于边界元法、龙格库塔四阶算法的仿真模拟考虑不到空间电荷效应<sup>[12]</sup>。本文将联合高能粒子仿真软件 Geant4

(GEometry ANd Tracking) 和三维电磁软件 CST (CST Studio Suite),研究软 X 射线辐照下碘化铯(CsI)阴极产生光电子的过程,以及光电子在特定电磁环境中的输运和聚焦特性。该方案涵盖了光电子从产生到成像的整个物理过程,具有更好的准确性与可移植性。

## 2 基于 Geant4 软件的 CsI 阴极光电子发射特性研究

电子从产生到发射的全过程十分复杂,涉及到 X 射线与物质、自由电子与物质的多种相互作用。为了简化光电子从产生到逸出的全过程,将其分为三个彼此独立的过程:1)入射光子能量被光电阴极材料吸收,与其核外电子相互作用从而产生初级电子;2)一定能量的初级电子与阴极中其他核外电子发生相互作用,激发出能量更低的次级电子;3)初级电子运动至阴极表面并克服势垒出射,形成光电流。这个物理过程是 Fan<sup>[13]</sup>在 1945 年提出的,当下已得到广泛应用,本文也基于它构建了 Geant4 模型,如图 1 所示。

### 2.1 Geant4 模型

CsI 是软 X 射线波段常用的光电阴极材料<sup>[14]</sup>,它的量子产额高、发射性能强,但是易潮解、受氧气影响大<sup>[15-16]</sup>。目前国内外的 X 射线条纹相机普遍采用 CsI 作为光电阴极材料,而光电阴极的发射特性会极大地影响乃至决定条纹相机的时空分辨能力。本文采用基

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2023-09-28; 录用日期: 2023-10-10; 网络首发日期: 2023-11-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0701003)、四川省自然科学基金(2022NSFSC0513)

通信作者: \*zh.kch@163.com

于蒙特卡罗方法的高能粒子仿真软件 Geant4 模拟 CsI 光电子的产生和输运过程,拟更加深入细致地研究其光电发射特性。

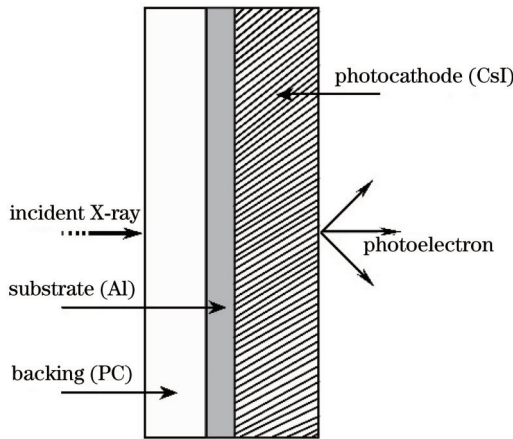


图 1 光电阴极模型

Fig. 1 Photocathode model

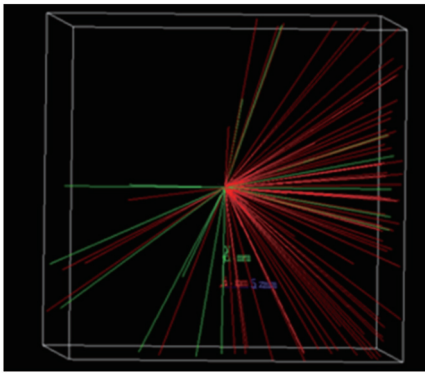


图 2 Geant4 的可视化模拟结果

Fig. 2 Visual simulation result of Geant4

CsI 薄膜一般厚度只有纳米量级,力学性能不佳,且作为绝缘体材料,面电阻高。因此它作为光电阴极时一般需要衬底薄膜来辅助支撑和导电基底来快速补充电子。本文 X 射线采用正入射方式,衬底薄膜采用 300 nm 厚的高透过率聚碳酸酯,导电基底则采用 20 nm 厚的铝膜。图 2 为 Geant4 的可视化模拟结果,绿色径迹为光子径迹,红色径迹为电子径迹。

## 2.2 光电子发射仿真结果

量子产额是指单个光子入射到光电阴极上激发出来的平均电子数,是衡量光电转换效率的关键参数。如图 3 所示,基底和衬底对二次电子的产额有一定的影响:在 1~10 keV 范围内,X 射线能量低于 8.5 keV 时,它们会略微增加二次电子的产额;而 X 射线能量高于 8.5 keV 时,它们会导致产额略微降低;此外,二次电子量子产额整体的趋势与 Henke 等<sup>[15-16]</sup>的实验结果能很好地吻合。

图 4 为 100 nm 厚的 CsI 光电阴极在不同能量的 X 射线辐照下逸出的光电子中的二次电子产额,可以看

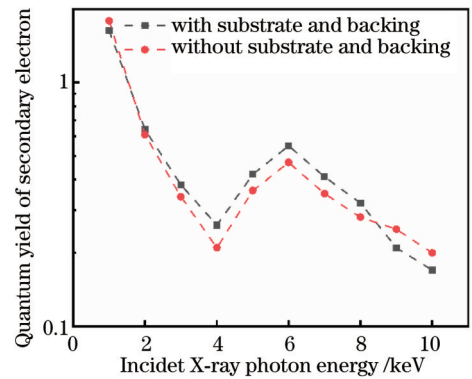


图 3 二次电子的量子产额

Fig. 3 Quantum yield of secondary electron

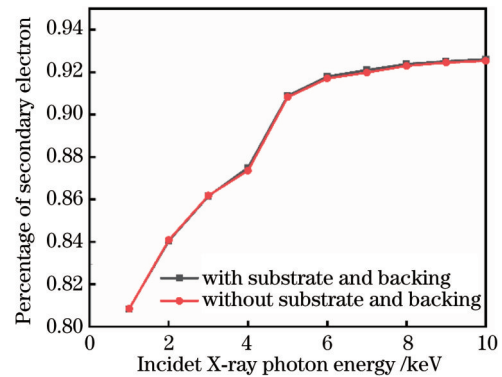


图 4 二次电子的产额

Fig. 4 Percentage of secondary electron

出,随着 X 射线能量的增加,二次电子产额也在不断上升,在射线能量低于 5 keV 时二次电子产额随射线能量的增加迅速升高,当射线能量高于 5 keV 之后二次电子产额的增加速度变慢。由模拟结果可以预测,随着 X 射线能量的继续增加,二次电子产额可能趋于稳定。

除了二次电子的产额,二次电子的能量分布、空间分布、出射时间分布都是决定光电阴极性能的重要参数,同时也是影响条纹相机时空分辨能力的关键因素。图 5 为 1~10 keV 的 X 射线正入射到有基底和衬底的 CsI 薄膜(厚度为 50~300 nm)上激发的二次电子的出射能量分布拟合曲线图,可以发现,射线能量和 CsI 薄膜厚度对二次电子的出射能量分布均无明显影响,出射能量分布的峰值在 1 eV 左右,半峰全宽约为 1.5 eV。模拟结果表明,这种光电阴极不仅拥有较高的量子产额,还具有较窄的二次电子能量分布。

设定粒子源以点源的方式发射,以粒子发射动量方向延长线与光电阴极电子出射面的交点为圆心,统计二次电子的出射位置,得到的位置分布如图 6 所示,出射位置均呈现出圆形弥散斑状。图 6(a)为不同能量 X 射线辐照 100 nm 厚的 CsI 薄膜时的电子位置分布,X 射线能量越大弥散斑越大。图 6(b)为不同厚度的 CsI 薄膜在 5 keV 的 X 射线辐照时的电子位置分布

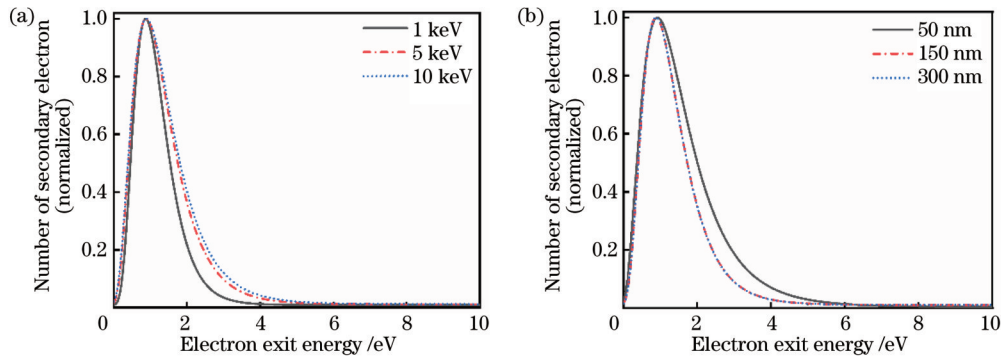


图 5 CsI 光电阴极的二次电子出射能量分布。(a) 不同能量 X 射线辐照 100 nm 厚的 CsI 薄膜；(b) 5 keV 的 X 射线辐照不同厚度的 CsI 薄膜

Fig. 5 Energy distribution of secondary electron emission of CsI photocathode. (a) 100 nm CsI film irradiated by X-rays with different energies; (b) CsI films of different thicknesses irradiated by 5 keV X-ray

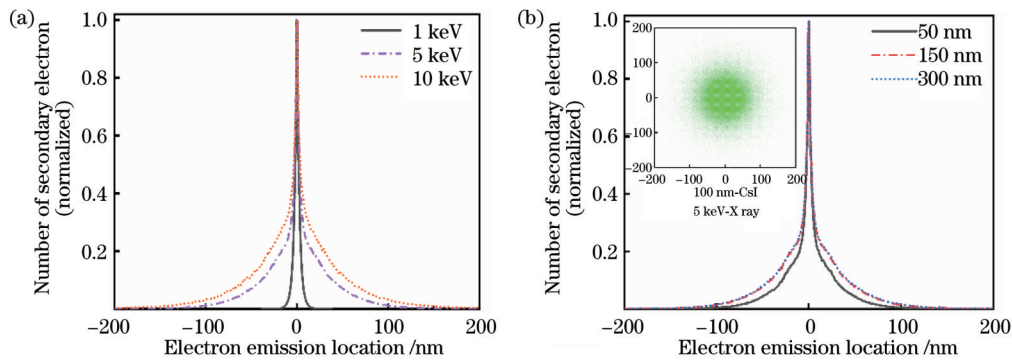


图 6 CsI 光电阴极的二次电子出射位置分布图。(a) 不同能量 X 射线辐照 100 nm 厚的 CsI 薄膜；(b) 5 keV 的 X 射线辐照不同厚度的 CsI 薄膜与 5 keV X 射线辐照下 100 nm 厚的 CsI 发射的二次电子位置

Fig. 6 Position distributions of secondary electron emission of CsI photocathode. (a) 100 nm CsI film irradiated by X-rays with different energies; (b) CsI films of different thicknesses irradiated by 5 keV X-ray and position of secondary electron emitted by 100 nm CsI with 5 keV X-ray irradiation

与 5 keV 的 X 射线辐照下 100 nm 厚的 CsI 发射的二次电子形成的弥散斑。

设定粒子从阴极面出射时的动量与出射面法线的夹角为出射角,当不同能量 X 射线辐照 100 nm 厚的 CsI 薄膜时,二次电子的出射角分布如图 7 (a) 所示,可见其受 X 射线能量变化影响不大。且二次电子出射角度分布曲线形状与余弦曲线相似,曲线峰值在 45° 左

右,与有无基底和衬底、CsI 薄膜厚度无明显相关性。时间分辨率是条纹变像管的一个重要参数,光电子发射出来的初始时间弥散是影响变像管时间分辨率的因素之一。当不同能量 X 射线辐照 100 nm 厚的 CsI 薄膜时,二次电子的出射时间分布如图 7 (b) 所示,不同能量 X 射线产生的二次电子的出射时间分布曲线很相近,半峰全宽约 1.5~2.0 fs。

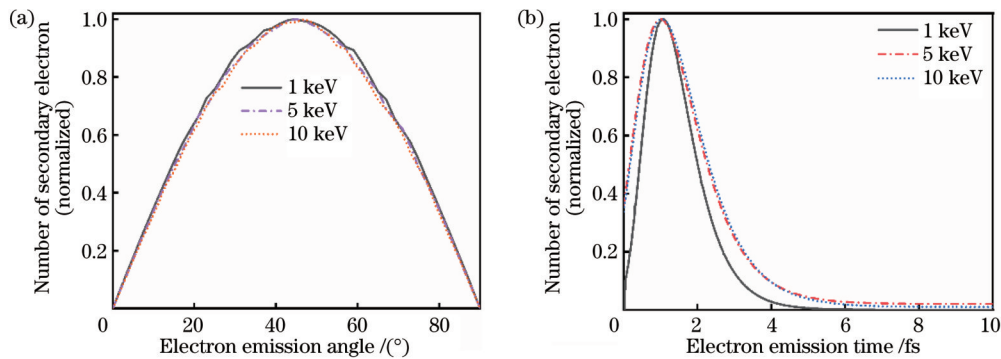


图 7 CsI 光电阴极的二次电子出射分布图。(a) 角度分布；(b) 时间分布

Fig. 7 Distributions of secondary electron emission of CsI photocathode. (a) Angular distribution; (b) time distribution

模拟过程中发现:不同厚度的 CsI 薄膜(50~300 nm)在 X 射线辐照时的出射角度分布和出射时间分布均无明显变化;且无论有无衬底,二次电子的出射能量分布、出射位置、出射角度、出射时间均无明显变化。

### 3 各向异性聚焦条纹变像管电子光学系统仿真

CST 是一款功能强大的电磁软件,能够模拟电子

束的运动以及电子束与电磁波的相互作用。但是, CST 自带的电子束产生方式,难以与光电阴极实际产生的二次电子的能量/空间分布保持一致。为了克服这种困难,本文编制自动数据交互程序,实现了 Geant4 与 CST 之间的数据交互。由于缩小电子束尺寸可以减少广角电子数、降低偏转像差、提升变像管时间精度<sup>[17]</sup>,在 CST 中建立了狭长阴极,尺寸为  $20\text{ mm} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ 。导入 Geant4 中仿真得到的出射光电子分布,得到的物面电子位置分布如图 8 所示。

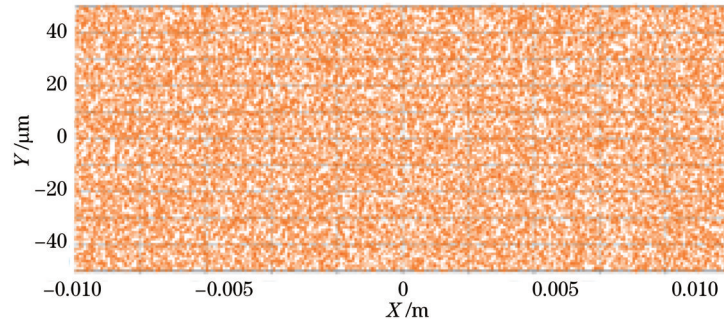


图 8 物面电子分布

Fig. 8 Object-surface electron distribution

在条纹相机的电子光学系统设计方面,本文采用了基于电四极透镜和矩形框柱透镜的各向异性聚焦变像管。沿电子束传输方向其结构依次为光电阴极、预时间聚焦系统(第一时间聚集电极与第一消隐电极)、空间聚焦系统、后时间聚焦系统(第二时间聚集电极与第二消隐电极)。这种结构之所以称为各向异性聚焦系统是因为它把时间方向上的焦点和空间方向上的焦点独立开来,实现对电子束的各向异性聚焦,削弱空间电荷效应并提升时空分辨率和成像质量<sup>[18-20]</sup>。

时间方向上的聚焦主要依靠由矩形框柱透镜组成的预时间聚焦系统、后时间聚焦系统,而空间方向上的

聚焦主要依靠电四极透镜组成的空间聚焦系统,如图 9 所示。

图 9 中,不同矩形框柱透镜设有不同电位;静电四极透镜是由四个截面呈双曲形的电极按相反的电性交替排列组成,这四个电极分成两组对称放置,相对位置的两个电极的电压幅值和电性均相同,相邻两个电极的电压幅值相同,电性相反。本文使用的各向异性条纹变像管在时间方向上使用了两个聚焦系统,相应地会发生两次聚焦,产生两个焦点(第一时间焦点与第二时间焦点);而空间方向上只使用了一个聚焦系统,发生一次聚焦,只有一个空间焦点。

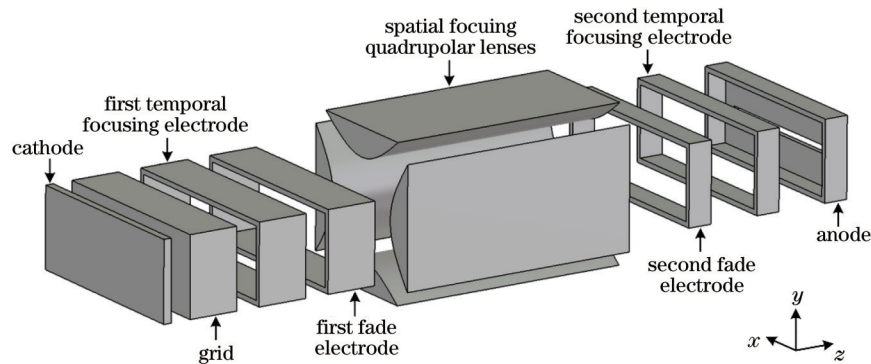


图 9 电子光学系统结构

Fig. 9 Electron optical system structure

#### 3.1 条纹变像管的仿真与优化

在 CST 中,若保持第一时间聚焦电极柱透镜在时间方向( $y$  方向)高度不变,增大电压或保持电压不变减小柱透镜高度,即增大聚焦电极电场强度,则电子束

在时间方向上的第一时间焦点的位置就会向前( $-z$  方向)移动,使得电子束在电四极透镜中输运时在时间方向弥散过大,导致电子束分层严重,如图 10(a) 所示。反之,若减小第一时间聚焦电极电场强度,电子束在时

间方向上的第一时间焦点就会向后 (+ $z$  方向) 移动, 靠近空间焦点。这将使得电子束的电荷密度变大, 空间电荷效应增强, 使得后续的空间聚焦、第二次时间聚

焦困难, 导致像面上的电子图像中间部分内凹, 如图 10(b) 所示。

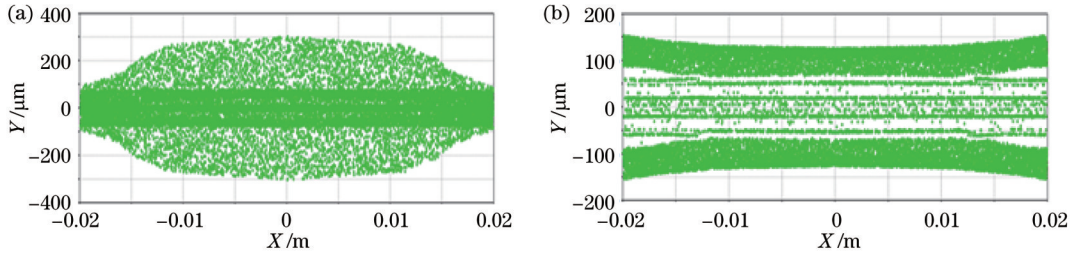


图 10 第一时间聚焦电极造成的像面畸变。(a) 聚焦电场过强;(b) 聚焦电场过弱

Fig. 10 Image-surface distortion caused by first temporal focusing electrode. (a) Focusing electric field is too strong; (b) focusing electric field is too weak

第一消隐电极柱透镜的电场强度设置与第一聚焦电极场强息息相关, 需要根据后者的变化及时调整。若第一消隐电极的电场强度过大, 也将导致第一焦点位置的前移 ( $-z$  方向), 使得空间方向上像面中间的电

子外凸, 形成电子弥散带, 如图 11(a) 所示。若第一消隐电极的电场强度过小, 则会导致电子束空间方向的电子密集带分裂, 使得像面上的电子分布图分层与内凹, 如图 11(b) 所示。

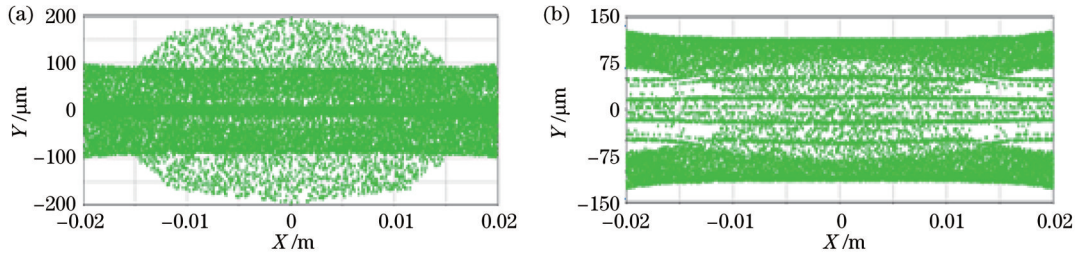


图 11 第一消隐电极造成的像面畸变。(a) 消隐电场过强;(b) 消隐电场过弱

Fig. 11 Image-surface distortion caused by first fade electrode. (a) Fade electric field is too strong; (b) fade electric field is too weak

第二聚焦电极、消隐电极中电场设置的影响与上述内容类似, 此处就不再赘述。而电四极透镜的关键参数包括电极的间距、电压、长度等。其中间距会影响电极中电子密集带的分布; 电压会影响空间聚焦后电子束的发射角、像面大小与图像分布; 长度会影响空间焦点的位置与放大倍率。实际上, 时间聚焦系统与空间聚焦系统中各结构都不是孤立的, 只有协调时空聚焦系统各结构参数, 合理设置时空焦点位置, 才能避免成像畸变, 获得理想的像面。经过在 CST 中的仿真优化, 得到的电子径迹如图 12 所示。可以发现, 此时空间焦点位于电四极透镜和第二消隐电极之间, 第一时间焦点、第二时间焦点分居前者两侧。

电子分布如图 13 所示。

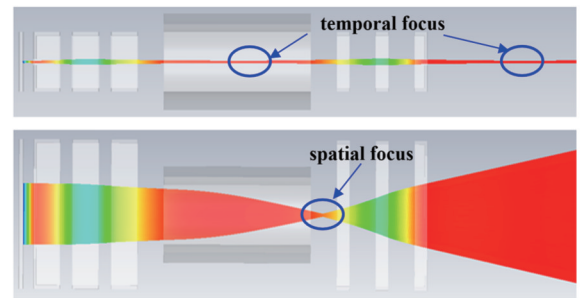


图 12 时间/空间方向上的电子径迹(非等比)

Fig. 12 Electron tracks in time/space direction (non-isotropic)

### 3.2 单 CST 仿真情况

放大倍率是变像管的重要参数之一。通常情况下, 时间分辨率会随着时间方向上放大倍率的减小而增大, 变像管的灵敏度也会提高。而空间方向上的放大倍率则会影响阴极的有效长度。为了使像面上的像更真实地反映出物面上的信息, 一般需要保证时空放大倍率保持一致。因此, 在设计变像管时, 必须合理控制时间和空间方向上的放大倍率, 以增加阴极的有效面积、提高时空分辨率和相机的测试灵敏度。通过优化调整, 最终得到横纵放大倍率为 2 的变像管, 其像面

为了更清楚地说明这种 Geant4-CST 联合仿真的性能优势, 本文对上述同一结构的变像管, 用 CST 自带生成器产生的电子分布和 Geant4 产生的电子分布两种情况下进行对比仿真, 比较二者物面/像面电子束的分布。在 CST 自带的生成器中, 设置电子束的初始能量为 0.5 eV, 能量变化方位为 10%, 电子束的立体角范围为  $30^\circ$ , 电子光学系统的其他设置与前文一致, 此时仿真结果如图 14 所示。将图 14 与 Geant4-CST

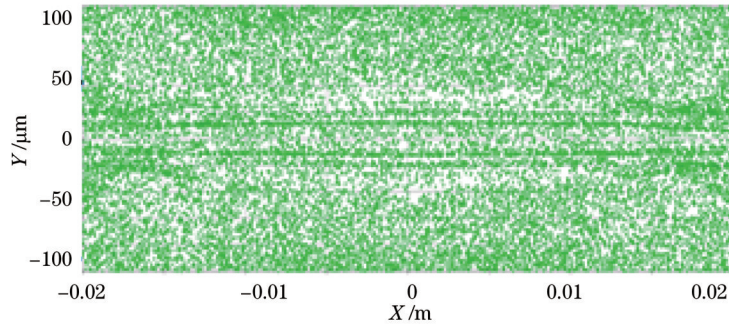


图 13 像面电子分布

Fig. 13 Image-surface electron distribution

联合仿真得到的物面电子分布图 8、像面电子分布图 13 相比较可以发现,联合仿真相较于单独的 CST 仿

真,其物面电子分布更均匀,像面的电子束分层和离散现象更弱,具有明显的优势。

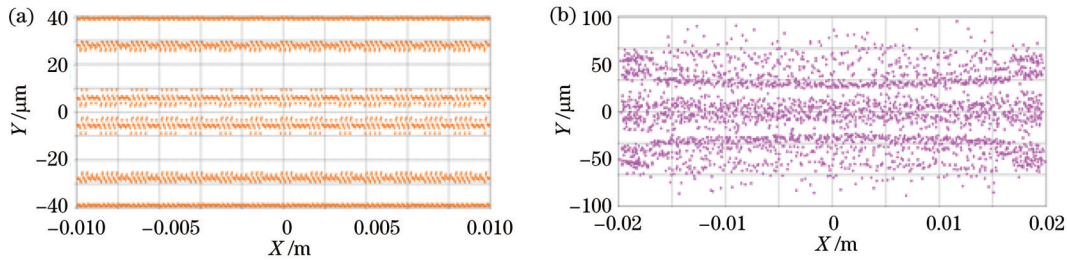


图 14 基于 CST 自带的生成器的模拟结果。(a) 物面电子分布;(b) 像面电子分布

Fig. 14 Simulation results based on CST's own generator. (a) Object-surface electron distribution; (b) image-surface electron distribution

## 4 结 论

本文联合粒子仿真软件 Geant4 和三维电磁仿真软件 CST,仿真了 CsI 阴极在软 X 射线辐照下,光电子的产生、输运和聚焦过程。通过 Geant4 中的仿真,本文探讨了在 1~10 keV 能量范围内 X 射线的辐照下,厚度为 50~300 nm 的 CsI 阴极的二次电子发射情况(能量峰值在 1 eV 左右)、二次电子产额(81%~92%)、二次电子出射时间半峰全宽(3.0 fs 左右)、二次电子出射区域(圆心弥散斑),以及二次电子出射角度(正弦分布)。通过将 Geant4 中出射电子分布导入 CST,探讨了各向异性聚焦条纹变像管的成像情况。通过协调时空聚焦系统各结构参数,合理设置时空焦点位置,避免了成像畸变,获得了理想的像面。本文实现了 Geant4 和 CST 的联合仿真,设计了一款以 CsI 为光电阴极的各向异性聚焦条纹变像管,在弧矢、子午方向上放大倍率皆为 2,能够满足工程实际需要。

### 参 考 文 献

[1] Zavoisky E K, Fanchenko S D. Image converter high-speed photography with  $10^{-9}$ - $10^{-14}$  sec time resolution[J]. Applied Optics, 1965, 4(9): 1155-1167.  
[2] 顾礼,宗方轲,李翔,等.大动态范围高时空性能 X 射线条纹相机的研制[J].光学学报,2017,37(12):1234001.  
Gu L, Zong F K, Li X, et al. Development of X-ray streak camera with large dynamic range and high temporal-spatial

resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1234001.  
[3] 顾礼,宗方轲,李翔,等.一种新型加速结构飞秒条纹相机的设计[J].光学学报,2015,35(11):1134001.  
Gu L, Zong F K, Li X, et al. Designment of a femtosecond streak camera with a novel accelerating structure[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1134001.  
[4] 胡昕,刘慎业,丁永坤,等.神光 III 主机 X 射线条纹相机设计[J].光学学报,2009,29(10):2871-2875.  
Hu X, Liu S Y, Ding Y K, et al. Design of SG-III X-ray streak camera[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2871-2875.  
[5] 许思源,李远锋,朱孝先,等.极紫外阿秒脉冲的色散控制及束线设计[J].中国激光,2021,48(5):0501009.  
Xu S Y, Li Y F, Zhu X X, et al. Dispersion control and beamline design of extreme ultraviolet attosecond pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501009.  
[6] 肖凯博,袁晓东,蒋新颖,等.欧洲 HiPER 项目激光驱动器概念设计研究现状[J].激光与光电子学进展,2015,52(8):080005.  
Xiao K B, Yuan X D, Jiang X Y, et al. Research status of conceptual designs of diode-pumped solid-state laser driver for HiPER[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080005.  
[7] Perkins L J, Orth C D, Lawrence M T, et al. Inertial confinement fusion[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(1): 1097-1117.  
[8] Glenzer S H, MacGowan B J, Michel P, et al. Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies [J]. Science, 2010, 327(5970): 1228-1231.  
[9] 范滇元,贺贤土.惯性约束聚变能源与激光驱动器[J].大自然探索,1999(1):31-35.  
Fan D Y, He X T. Inertial confinement fusion energy and laser driver[J]. Discovery of Nature, 1999(1): 31-35.  
[10] Tian J, Ding Y, Cao X, et al. Development of streak camera with anisotropic focusing electron optical system[J]. Proceedings

- of SPIE, 2013, 8796: 87960Z.
- [11] 廖昱博. 高时空分辨磁聚焦分幅变像管研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019: 8-13.  
Liao Y B. Study on high time-space resolution magnetic focusing framing image converter[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019: 8-13.
- [12] 白雁力. 时间展宽分幅变像管时空性能研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017: 17-22.  
Bai Y L. Study on spatio-temporal performance of time-broadening framing image converter[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017: 17-22.
- [13] Fan H Y. Theory of photoelectric emission from metals[J]. Physical Review, 1945, 68(1/2): 43-52.
- [14] 张益军. 半导体光电阴极的研究进展[J]. 红外技术, 2022, 44(8): 778-791.  
Zhang Y J. Progress in research on semiconductor photocathodes [J]. Infrared Technology, 2022, 44(8): 778-791.
- [15] Henke B L, Liesegang J, Smith S D. Soft-x-ray-induced secondary-electron emission from semiconductors and insulators: models and measurements[J]. Physical Review B, 1979, 19(6): 3004-3021.
- [16] Henke B L, Knauer J P, Premaratne K. The characterization of X-ray photocathodes in the 0.1-10-keV photon energy region[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(3): 1509-1520.
- [17] Shakya M M, Chang Z H. An accumulative X-ray streak camera with 280-fs resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5534: 125-131.
- [18] 陈韬, 胡昕, 刘慎业. 双板电极结构 X 射线变像管数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2593-2595.  
Chen T, Hu X, Liu S Y. Numerical simulation of X-ray image converter tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2593-2595.
- [19] 刘杰, 丁永坤, 田进寿, 等. 模块化程控各向异性聚焦条纹相机[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2405-2410.  
Liu J, Ding Y K, Tian J S, et al. Modular remote-controllable anisotropic focusing streak camera[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2405-2410.
- [20] 赵廷靖, 惠丹丹, 田进寿, 等. 各向异性聚焦大动态条纹变像管[J]. 光子学报, 2018, 47(12): 1223003.  
Zhao T J, Hui D D, Tian J S, et al. High dynamic range anisotropic focusing streak tube[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(12): 1223003.

## Photoelectron Generation and Control of Streak Tubes Based on Geant4-CST Co-Simulation

Liao Yuxiang, Wang Zichen, Tang Lin, Feng Yuming, Zhao Xiaoyan, Liu Diwei,  
Zhang Kaichun\*

*THz Center, School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of  
China, Chengdu 611731, Sichuan, China*

### Abstract

**Objective** In recent years, inertial confinement fusion (ICF) technology has developed rapidly and exhibited its great potential for applications. In ICF experiments, the pellet will radiate a large amount of X-rays, and the nuclear fusion process can be analyzed by studying the spatio-temporal properties of X-rays. However, the nuclear fusion duration is short (nanosecond-picosecond order), with requirements of high spatial resolution and large dynamic range. However, the commonly applied ultra-rapid diagnostic instruments are more or less defective, among which the optomechanical high-speed camera cannot monitor ultrafast phenomena below the nanosecond order, with sufficient temporal resolution. Electro-optical or magneto-optical shutter high-speed camera makes it difficult to monitor weak signals due to a shutter resulting in incident light loss. Therefore, the study of streak cameras (streak tubes) with ultra-high spatio-temporal and light intensity resolution capabilities is of significance for detecting X-rays in ICF experiments. The anisotropic focusing streak tubes can achieve anisotropic focusing of electron beams by making the temporal-directed focusing system and the spatial-directed focusing system independent of each other. This tube type can not only improve the spatial resolution by increasing the magnification of the streak tube, but also suppress the space charge effect, reduce the aberration in the spatial direction, and improve the dynamic range and temporal resolution of the streak tubes.

**Methods** At present, it is difficult for the existing simulation software to completely simulate the whole physical process of streak tubes. Although CST (CST Studio Suite) and other electromagnetic simulation software can suitably reflect the electron transport and the interaction between electrons and electromagnetic fields, less credible results are given for the photoelectron generation process. Therefore, when designing a streak tube, researchers generally need to specially program to calculate the photoelectron distribution of the photocathode based on the Monte Carlo method. However, generally, a programme can only be adopted for one or a few cases, which makes it less portable. Additionally, it is more difficult to verify the results of purely theoretical calculations. Therefore, we employ a high-energy particle simulation software Geant4 (GEometry ANd Tracking) developed by the European Organization for Nuclear Research based on the Monte Carlo method to simulate the photoelectron generation process. Then, based on the simulation results of Geant4,

we leverage CST to simulate the subsequent electro-optical system. Finally, the design of an anisotropic focusing streak tube is realized by the software co-simulation.

**Results and Discussions** The high-energy particle simulation software Geant4 is introduced to ultrafast diagnostics, the co-simulation from Geant4 to CST is realized, and an anisotropic focusing streak tube design that encompasses the entire process of photoelectron generation, transmission, focusing, imaging, and interaction between electrons and electromagnetic fields is yielded. Compared with the traditional simulation method, the photoelectron generation process is visualized in this scheme, and the photoelectron distribution is more consistent with the actual experimental situation. Meanwhile, since Geant4 can provide models for the electromagnetic, strong, and weak interaction between substances and particles of different energy to simulate the complete physical process, this scheme can be adapted to a wider range of photoelectron generation situations and is highly portable.

**Conclusions** By adopting the co-simulation from Geant4 to CST, an anisotropic focusing streak tube with a CsI photocathode is designed, and the magnification ratio is 2 in both the sagittal and meridional directions, which can meet the practical engineering needs. The secondary electron emission from CsI photocathodes with a thickness of 50–300 nm irradiated by X-rays in the energy range of 1–10 keV is investigated by simulation in Geant4. In this process, the peak of secondary electron energy is around 1 eV, the proportion of secondary electrons is around 85%, and the half-height width of the secondary electron emission time is about 3.0 fs, with the angle of the secondary electron emission sinusoidally distributed from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , and the outline of emission electron being nearly a circular diffuse spot. The Geant4 results are subsequently imported into CST to explore the imaging of anisotropic focusing streak tubes in this case. Additionally, the effects of the temporal focusing system and spatial focusing system on the imaging results of the streak tube are obtained. By optimizing each structure parameter in the electro-optical system, the imaging aberration is wiped out to realize a uniform image-surface electron distribution. The electro-optical system with electron distribution generated by the CST self-generator and the Geant4 is simulated respectively, and the distributions of the electron beams on the object-surface and image-surface obtained for each of the two cases are analyzed. Finally, we find that the imaging results obtained by Geant4 are more uniform and reasonable, and this simulation scheme is more consistent with the actual situation.

**Key words** X-ray optics; Geant4; co-simulation; cesium iodide; photoemission characteristics; anisotropic focusing streak tube