

高能电子三维成像技术实验研究

李双双 赵全堂 曹树春 冉朝晖 申晓康 赵书俊 张子民

Experimental demonstration of three-dimensional high energy electron radiography

Li Shuang-Shuang Zhao Quan-Tang Cao Shu-Chun Ran Zhao-Hui Shen Xiao-Kang Zhao Shu-Jun
Zhang Zi-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 184204 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210686

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210686>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

原子尺度材料三维结构、磁性及动态演变的透射电子显微学表征

Atomic scale characterization of three-dimensional structure, magnetic properties and dynamic evolutions of materials by transmission electron microscopy

物理学报. 2021, 70(6): 066801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202072>

小波变换在太赫兹三维成像探测内部缺陷中的应用

Wavelet transform in the application of three-dimensional terahertz imaging for internal defect detection

物理学报. 2017, 66(8): 088701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.088701>

基于希尔伯特变换的结构光照明快速三维彩色显微成像方法

Fast structured illumination three-dimensional color microscopic imaging method based on Hilbert-transform

物理学报. 2020, 69(12): 128701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200352>

三维物体多重菲涅耳计算全息水印与无干扰可控重建方法

Multiple Fresnel computer-generated hologram watermark of three-dimensional object and its adjustable reconstruction without interference

物理学报. 2017, 66(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.234202>

基于径向剪切干涉仪的三维位移测量技术

Measurement of three-dimensional displacements by radial shearing interferometer

物理学报. 2021, 70(7): 070701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201451>

激光高能X射线成像中探测器表征与电子影响研究

Detector characterization and electron effect for laser-driven high energy X-ray imaging

物理学报. 2017, 66(24): 245201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.245201>

高能电子三维成像技术实验研究*

李双双¹⁾²⁾ 赵全堂^{2)3)†} 曹树春²⁾³⁾ 冉朝晖²⁾
申晓康²⁾³⁾ 赵书俊^{1)‡} 张子民²⁾³⁾

1) (郑州大学物理学院, 郑州 450000)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

3) (中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

(2021年4月12日收到; 2021年5月6日收到修改稿)

高能电子成像技术被首次提出作为温稠密物质和惯性约束聚变实验研究的高时空分辨诊断工具之一, 现已通过前期实验证明其对中尺度科学诊断的可行性. 为了进一步提高高能电子成像技术诊断样品的能力, 来获取样品内部信息, 将高能电子成像技术和三维重建算法结合, 提出了高能电子三维成像技术. 本文主要通过实验研究了高能电子三维成像技术的可行性. 不同三维重建算法重建样品的结果首次证实了高能电子三维成像技术的可行性, 使用的三维重建算法包括滤波反投影算法、迭代算法-代数重建技术和联立代数重建技术, 最终重建的 x, y, z 方向上的不同重建切片图像清楚地显示了样品的详细结构. 实验证实的高能电子三维成像技术将有利于拓展高能电子成像技术的应用领域, 尤其是在中尺度科学领域.

关键词: 高能电子成像, 三维重建算法, 高能电子三维成像, 中尺度科学

PACS: 42.30.Wb, 41.85.Ja, 41.75.-i, 07.78.+s

DOI: 10.7498/aps.70.20210686

1 引言

近年来, 有关高能密度物理 (high energy density physics, HEDP) 和惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 的研究日益受到重视并得到发展, 特别是其诊断方法是面临的一大挑战^[1]. 为了对 HEDP 和 ICF 进行深入研究, 提出了一种具有高时空分辨的高能电子成像技术 (high energy electron radiography, HEER)^[2]. 目前高能电子成像技术在仿真和实验中都得到了很好的研究^[3-8]. 由于高能电子束穿透力强, HEER 可以用于较厚样品 (几十微米到毫米) 的诊断, 现阶段通过实验表

明 HEER 的空间分辨率接近 $1 \mu\text{m}$ ^[9].

目前许多射线照相诊断工具都基于 X 射线、中子和质子束. 以软 X 射线为基础的 X 射线显微镜是研究生物材料的理想选择. 硬 X 射线 (光子能量大于 10 keV) 由于其超强的穿透力被用于临床医学诊断疾病、工程和工业检测缺陷. X 射线点投影背光成像已被用于高能量密度物质 (high energy density materials, HEDM) 实验^[10], 其空间分辨率约为 $10 \mu\text{m}$ ^[11]. 在 SG-II 升级激光设备上, 用短脉冲激光驱动的硬 X 射线进行了双壳内爆实验^[12], 但通过 X 射线获得的图像空间分辨率不及 HEER. 短脉冲中子被应用于了解温稠密物质的动态过程^[13]. 中子射线照相的优势在于对低原子序数元

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFA0404900)、国家自然科学基金 (批准号: 11875303) 和中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (批准号: 113462KYSB20160036) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaquantang@impcas.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhaosj@zzu.edu.cn

素的材料具有极高的敏感性^[14]. HEDM 的材料一般由重金属组成, 中子射线对其不敏感, 且中子与金属之间的反应截面太小, 无法有效地对 HEDM 成像. 中子成像诊断是 NIF 进行惯性聚变研究的工具, 但其成像的空间分辨率大于 10 μm^[15], 大于 HEER 的空间分辨率. 高能质子射线照相术在诊断 HEDM 时显示了其优异的性能^[16]. 然而在实验室中不容易产生超短脉冲 (ps 量级) 的高能质子束, 而高能电子成像具有高时空分辨率的优势. 由于质子与物质之间的相互作用相对单一, 因此很难反映物质的不同性质. 此外对比高能质子加速器, 高能电子加速器和相应的成像系统造价更低廉.

高能电子三维重建 (three-dimensional high energy electron radiography, TDHEER) 技术将 HEER 与三维 (three dimensions, 3D) 重建算法相结合, TDHEER 技术的有效性和可行性已通过静态中尺度样品的模拟实验研究得到证实^[17]. 为了通过实验验证该技术, 在本文研究中进行了毫米级样本的重建. 根据 Nyquist 采样理论, 重建使用的投影数据越少, 则同种算法重建所花费的时间就越少, 但会增加伪影降低图像质量. 重建的目标是在满足重建结果质量的同时, 花费尽可能少的时间. 因此在实验中分别使用了三组不同数目的投影图像集: 180, 36 和 18, 以及三种不同的重建算法, 包括解析和迭代算法来重建样本. 结果发现, 使用不同的算法及投影集重建的图像质量和重建时间是不同的. 为提高重建图像的质量并且减少重建时间, 有必要选择合适的算法.

2 TDHEER 原理

TDHEER 的主要思想是使用 3D 重建算法重

建获取的 2D HEER 数据以获得样本的切片图像. HEER 的原理如图 1 所示: 由电子直线加速器产生的高能电子束 (50 MeV) 穿过样品, 电子束与样品相互作用后将富含样品的信息, 再经由具有一定放大倍数的四极磁透镜系统在荧光屏上实现点对点成像, 最后通过 CCD 相机采集高能电子图像. 电子束与物质的相互作用主要包括电离、激发、韧致辐射, 这三种相互作用都会导致电子能量的损失^[18]. 由于实验采用的是高能电子束, 韧致辐射会更加明显, 并且由其带来的能量损失占据主导地位, 其能量损失可表示为

$$f(E) = \frac{1}{E_0} \left\{ \left[\ln \left(\frac{E_0}{E} \right) \right]^{\frac{4\delta x}{3X_0} - 1} / \Gamma \left(\frac{4\delta x}{3X_0} \right) \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha \frac{N_a}{A} Z(Z+1)r_e^2 \ln \left(183Z^{-\frac{1}{3}} \right), \quad (2)$$

其中 E_0 , E 分别为电子的初始能量和穿过物质后的能量; δ 是物质材料的密度; x 是物质的厚度; $\alpha = 1/137$ 为精细结构常数; $r_e = e^2/m_e c^2$ 是古典电子半径; N_a , Z 和 A 分别是阿伏伽德罗常数, 物质原子的原子序数和质量数; X_0 是电子辐射长度, 其表示为当物体厚度为 X_0 时, 电子在物质中因辐射损失而使得能量衰减至原初始能量的 $1/e$.

电子束与物质相互作用后的角度发散主要由于电子的多重散射, 可由 Molière 模型描述多库仑散射作用下出射电子的角度分布:

$$f(\phi) = \frac{1}{\phi_0(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\phi}{\phi_0(t)} \right)^2}, \quad (3)$$

$$\phi_0(t) = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{t(1 + 0.038 \ln(t))}, \quad (4)$$

其中 $\phi_0(t)$ 和 ϕ 分别为电子的初始角度和散射后的

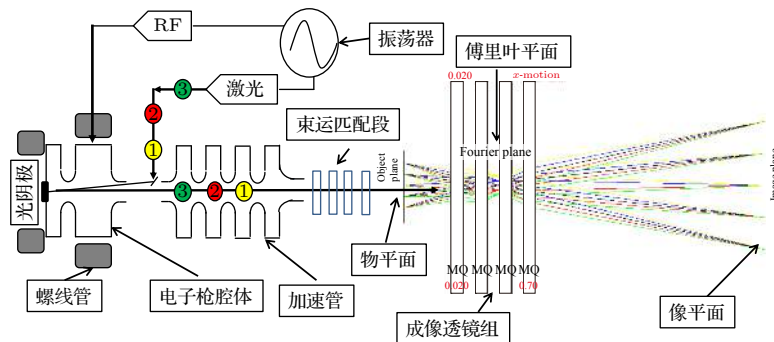


图 1 HEER 的布局原理图

Fig. 1. Layout and principle of HEER.

角度, p 是电子的动量, βc 是电子的速度, t 是物质的厚度 x 与电子辐射长度 X_0 之比. 实验中电子束的能散较低 (约 0.1%), 主要根据透射电子的散射角分布对物质进行成像.

成像透镜系统中存在傅里叶平面, 用于筛除由多库仑散射导致散角过大的电子, 从而提高空间分辨率. 荧光屏是 Ce:YAG 屏幕, 实现将电信号转换为光信号. 当 CCD 相机直接对准荧光屏成像时, 由于受到强辐射采集到的图像会有大量噪声. 因此在荧光屏后添加一面反光镜, 变换光路, 使得光线偏转 90° 后再由相机采集. 3D 重建算法包括非迭代和迭代算法, 已广泛应用于医学图像重建^[19]、工业 CT^[20] 和其他 3D 射线照相中. TDHEER 类似于电子断层扫描技术, 因此对 TDHEER 采用电子断层扫描中使用的算法, 即滤波反投影 (filtering back projection, FBP)^[21]、迭代算法-代数重建技术 (algebraic reconstruction technique, ART)^[22] 和联立代数重建技术 (simultaneous algebraic reconstruction technique, SART)^[23] 来重建二维 HEER 数据.

采集 2D HEER 数据的实验原理如图 2 所示, 沿 Z 轴传播的高能电子束穿过目标样品的 X - Y 平面, 经由成像透镜系统聚焦透射电子实现点对点成像, 最终获得 X - Y 平面 2D HEER 图像. 将样品放置在旋转平台上, 该平台可以绕 Y 轴 ($\pm 90^\circ$) 旋转, 每次旋转的角度间隔为 1° , 每旋转一次采集一幅 2D HEER 图像, 通过 CCD 相机收集了从 0° 到 179° 的共计 180 张图像. 为便于样品制备, 实验样品是手表的 1 个零件如图 3 所示, 其尺寸如下: 长度 \times 厚度 \times 高度为 $3.34 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 2.18 \text{ mm}$. 图 3(a) 和图 3(b) 分别是样品的正视图和左视图, 以其长度为 X 轴, 高度为 Y 轴, 厚度为 Z 轴, 建立 3D 坐标系如图 3(c) 所示. 该实验在兰州高能电子

成像实验平台上进行, 实验中使用的电子束参数如下: 束团能量为 50 MeV, 能散为 0.1%, 归一化发射度约为 $8.0 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$, 束团电荷量约为 100 pC, 均方根束长约为 1.5 ps ^[24].



图 2 获取 2D HEER 数据的实验原理

Fig. 2. Experimental principle of acquiring 2D HEER data.

3 毫米级样品的重建结果

3.1 2D HEER 图像预处理

在实验中, 使用优化后的四极成像透镜系统来获得 2D HEER 图像, 其放大倍数为 -2.88 ^[5]. 图 4 展示了样品分别在 0° , 45° , 135° 和 180° 旋转角度下拍摄的 2D HEER 图像. 分析图像发现含有噪声, 其主要来源是 CCD 的固有噪声以及一些由 X 射线引起的噪声. 由于在图像采集过程中这些噪声不可避免地引入并影响最终的重建质量, 因此首先分析噪声类别并选择合适的滤波器将其滤除. 经分析得出噪声的主要成分是椒盐噪声, 分别用 3 种滤波器: 均值滤波器^[25]、中值滤波器^[26]和小波滤波器^[27]进行滤波降噪, 同一图像分别经过 3 个滤波器处理后的信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 结果分别为 19.6165, 19.6411 和 16.6871. 图像的 SNR 越高, 图像质量越好, 因此选择中值滤波器来处理图像. 由于重建算法要求投影图像具有相同的长度和宽度, 因此将原始大小为 2448×2048 像素的图像裁剪到仅包含样本的 1670×1670

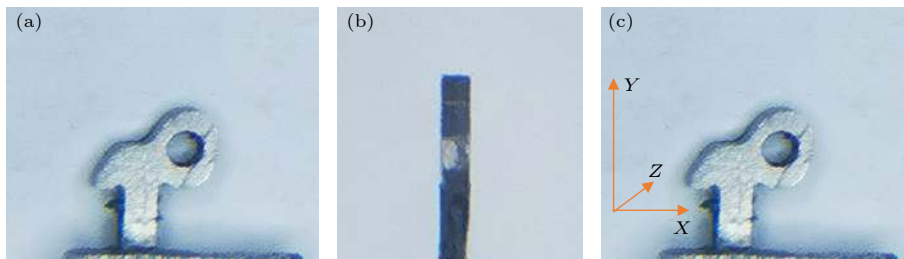


图 3 实验样品 (a) 正视图; (b) 左视图; (c) 3D 坐标系

Fig. 3. Experimental sample: (a) The front view; (b) the left view; (c) the 3D coordinate diagram.

像素的区域. 此外当图像分辨率相同时, 图像尺寸越小, 重建时间越短, 将尺寸 1670×1670 压缩为 167×167 像素, 以加快重建速度. 最终获得用于重建的 180 幅 2D HEER 图像, 其尺寸为 167×167 像素.

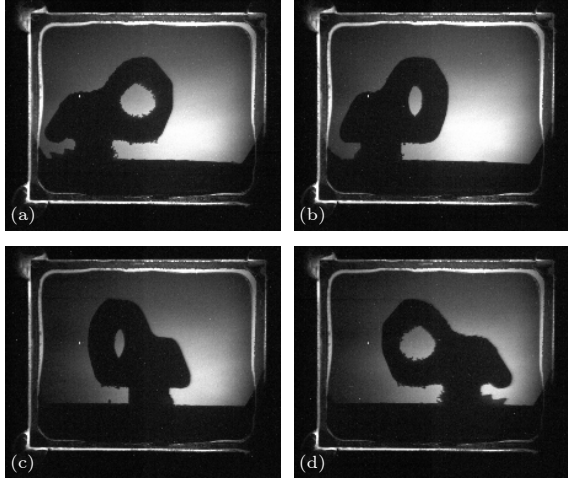


图 4 2D HEER 图像 (a)—(d) 旋转角度分别为 0° , 45° , 135° 和 180°

Fig. 4. 2D HEER images: (a)—(d) Rotation angle is 0° , 45° , 135° , 180° , respectively.

3.2 旋转角度间隔 1° 的三维重建结果

解析重建算法 FBP 能够克服常规反投影的局限性, 当 FBP 被应用于 180 幅 2D HEER 图像的全角度投影重建时, 其重建结果要优于稀疏角度投影重建^[20]. 因此采用由 HEER 平台收集的样本 180 幅 HEER 图像 (从 0° 到 179° , 间隔 1°) 用于三维重建. 最基础的迭代重建算法是 ART, 当使用稀疏投影数据时, 诸如 ART 之类的迭代算法的重建结果要优于 FBP^[28], 但 ART 要比 FBP 花费更多的重建时间. 当使用与 ART 相同的参数时, 采用 SART 可获得与 ART 大致相同的图像质量但其重建时长在 FBP 和 ART 之间^[29]. 在重建过程中, 调整 ART 和 SART 的松弛因子、迭代次数和迭代初始值, 以获得良好的重建结果. FBP, ART 和 SART 算法重建的样品分成 X , Y 和 Z 三个方向, 每个方向中共有 236 个重建切片, 切片大小为 $6.24 \text{ cm} \times 6.24 \text{ cm}$. 在 X 方向上重建的从 X^- 到 X^+ 的第 95, 134 和 145 层的切片如图 5 所示. 在 Y 方向上重建的从 Y^- 到 Y^+ 的第 89, 124 和 150 层的切片如图 6 所示. 在 Z 方向上重建的从 Z^- 到 Z^+ 的第 52, 120 和 155 层的切片如图 7 所示.

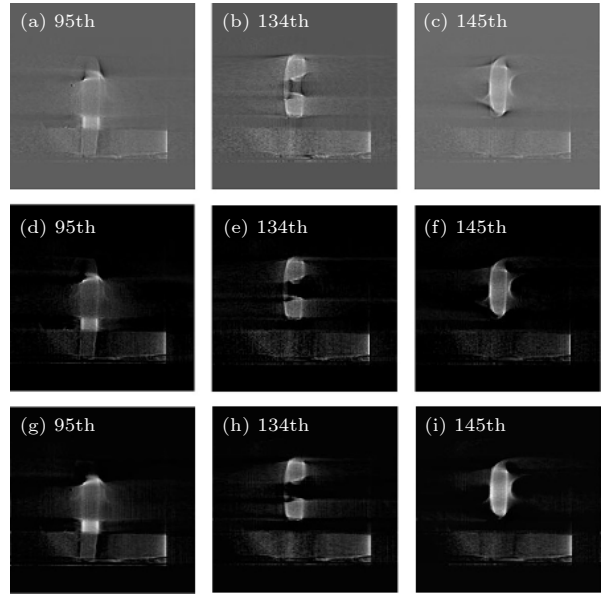


图 5 从 X^- 到 X^+ 在第 95, 134 和 145 层使用不同算法重建的切片的结果 (a)—(c) FBP; (d)—(f) ART; (g)—(i) SART
Fig. 5. Results of reconstructed slices with different algorithms, at the 95th, 134th and 145th layers from X^- to X^+ : (a)—(c) FBP; (d)—(f) ART; (g)—(i) SART.

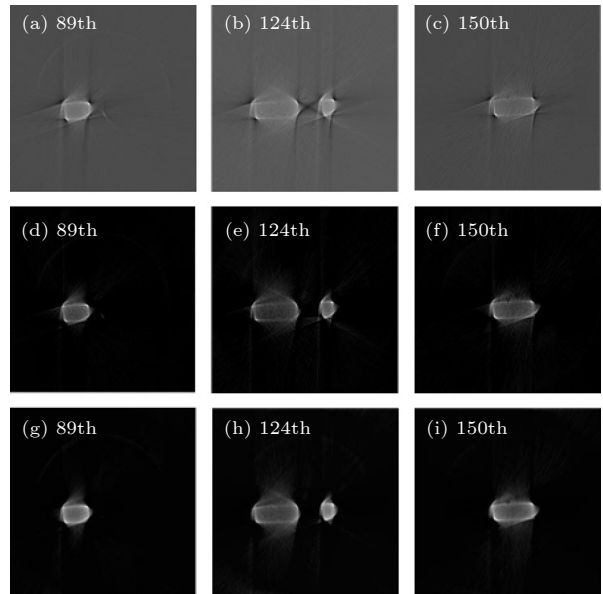


图 6 在 Y^- 到 Y^+ 的第 89, 124 和 150 层使用不同算法重建的切片的结果 (a)—(c) FBP; (d)—(f) ART; (g)—(i) SART
Fig. 6. Results of reconstructed slices with different algorithms, at the 89th, 124th and 150th layers from Y^- to Y^+ : (a)—(c) FBP; (d)—(f) ART; (g)—(i) SART.

根据图 5—7 中的重建图像可知, 三种算法 FBP, ART 和 SART 都可用于高能电子三维成像. 与 ART 和 SART 相比, FBP 的重建结果可以显示更多细节, 但存在一些伪影. 分析 FBP, ART 和 SART 重建的 Y 方向上的第 124 层切片中第

151 列的像素灰度分布图, 如图 8(b) 所示, 即图 8(a) 中红线位置的像素灰度分布. 根据曲线走势分布表明, ART 和 SART 算法重建的图像是等效的.

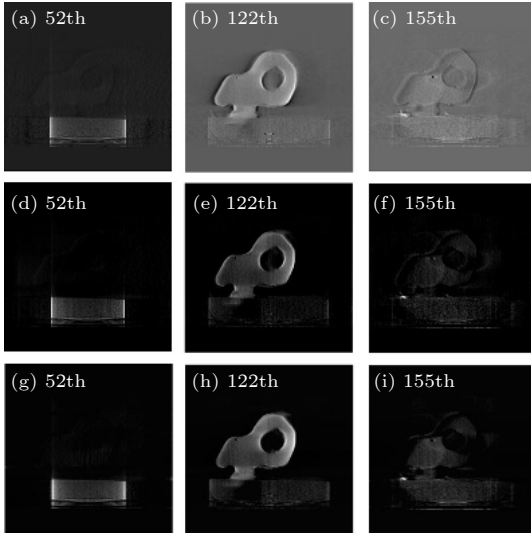


图 7 从 Z - 到 $Z+$ 在第 52, 122 和 155 层使用不同算法重建的切片的结果 (a)–(c) FBP; (d)–(f) ART; (g)–(i) SART
 Fig. 7. Results of reconstructed slices with different algorithms, at the 52nd, 122th and 155th layers from Z - to $Z+$: (a)–(c) FBP; (d)–(f) ART; (g)–(i) SART.

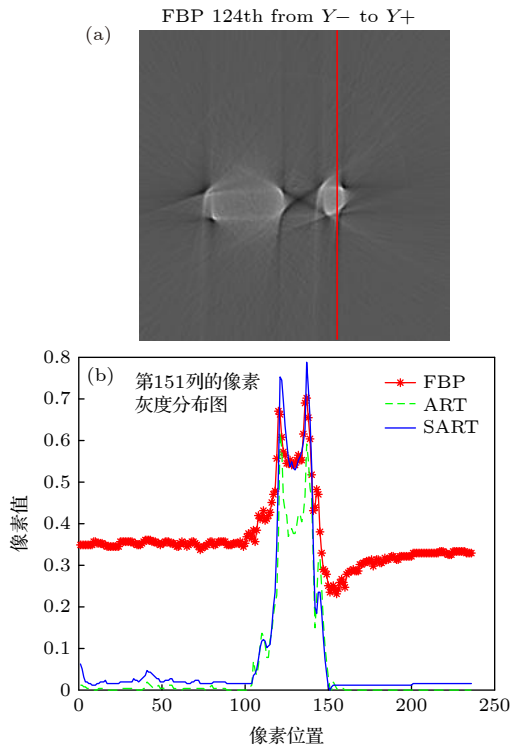


图 8 (a) FBP 重建的从 Y - 到 $Y+$ 第 124 个切片图像; (b) 是 (a) 中红线的像素灰度分布图
 Fig. 8. (a) The 124th slice image from Y - to $Y+$ reconstructed by FBP; (b) the pixels grayscale of the red line of panel (a).

3.3 旋转角度间隔 5° 的 3D 重建结果

为了减少噪声影响、2D HEER 数据采集时间及加快重建速度, 使用从 0° 到 179° 间隔 5° 的共 36 张 2D HEER 图像数据集来重建. 由于 36 张 2D HEER 图像无法满足 Nyquist 采样理论, 使用解析算法 FBP 会产生影响图像质量的伪影. 与解析类算法 (假定采集位置连续) 相比, 基于 ART 的方法都是非统计性的, 能更好地对采集过程的几何模型进行建模. 因此基于 ART 的方法可以更好地处理稀疏数据和采样位置不规则的采样. 为了定量分析 ART 和 SART 的结果, 以 180 张图像重建的 FBP 结果作为基准, 使用两个评价指标作为参考.

归一化均方距离准则 d :

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^N (t_{u,v} - r_{u,v})^2}{\sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^N (t_{u,v} - \bar{t})^2}}. \quad (5)$$

归一化平均绝对距离准则 r :

$$r = \left(\sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^N |t_{u,v} - r_{u,v}| \right) / \left(\sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^N |t_{u,v}| \right). \quad (6)$$

在 (5) 式和 (6) 式中, $t_{u,v}$ 和 $r_{u,v}$ 分别表示参考图像和重建图像的第 u 行和第 v 列的像素密度; N 是每行或每列像素总数; \bar{t} 是参考图像的像素平均值, 图像的像素数为 236×236 . d 和 r 的值反映了重建图像的质量, 值越小则重建图像与原始图像越接近. ART 和 SART 重建的 Y 方向上从 Y - 到 $Y+$ 的第 100 层和第 127 层的切片如图 9 所示.

分析表 1 数据, 当重建同一张图片时, SART 算法重建的图像的 d 和 r 值小于 ART 重建的图像的 d 和 r 值, 即 SART 算法重建的图像更接近原始图像. 将图 6 与图 9 进行比较, 由于使用较少的 2D HEER 图像数量, 所以图 9 中的伪影更加严重.

表 1 ART, SART 重建切片的 d 和 r 值
 Table 1. Value of d and r of the image reconstructed by ART and SART.

切片位置	重建算法	d	r
Y 100th	ART	11.0736	0.8820
	SART	10.9060	0.8672
Y 127th	ART	9.0947	0.9076
	SART	8.9520	0.8933

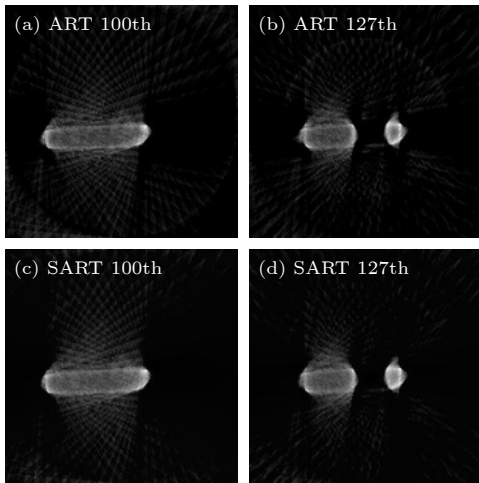


图9 Y-到Y+的第100层和第127层使用不同的算法得出的结果 (a), (b) ART; (c), (d) SART

Fig. 9. Reconstructed slices results with different algorithms, at the 100th and 127th layers from Y- to Y+: (a), (b) ART; (c), (d) SART.

为了在获得高质量图像的同时尽可能缩短整个重建过程, 因此测试了旋转间隔为 10° 的 2D HEER 数据集. 不同算法重建的 Y 轴的第 127 个切片的结果如图 10 所示, 图 10(a) 和图 10(b) 分别是 ART 和 SART 算法的结果, 图 10(a) 与图 10(b) 相似, 尽管使用不同的重建算法两者都具有许多

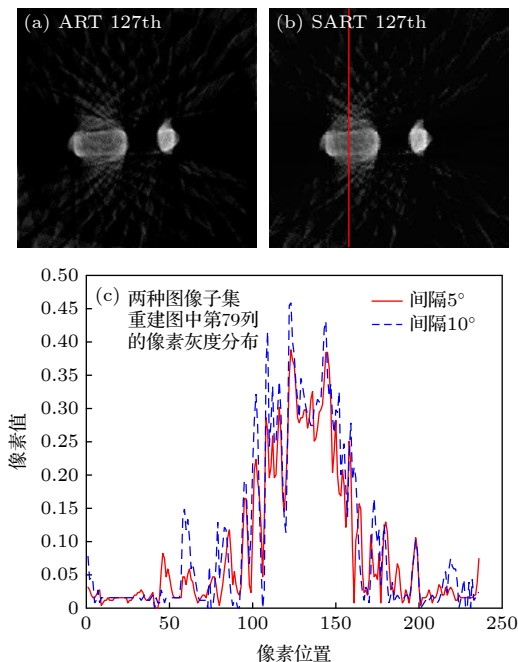


图 10 从 Y-到Y+在第127层重建切片的结果 (a) ART; (b) SART; (c) 是(b)中红线的像素灰度分布

Fig. 10. Results of reconstructed slices at the 127th layer from Y- to Y+: (a) ART; (b) SART; (c) the pixels gray-scale of the red line of panel (b).

伪影, 但此时 SART 算法的重建时间更短. 图 10(c) 对比了同种算法重建不同投影子集时图像的像素灰度分布, 与 5° 间隔的投影数据集相比, 10° 间隔的投影数据集重建的图像具有更多的伪影. 这与重建中使用的 2D HEER 数据越少, 重建图像质量越差的规则相符. 因此, 将 SART 算法与间隔 5° 的 2D HEER 数据相结合更有利于本实验数据的重建, 在获得高质量的重建图像的同时花费更少的时间.

4 结果与讨论

通过本实验研究首次证明了高能电子三维成像技术的可行性, 获得了样品的 3 个维度切片. 通过将不同的 3D 重建算法应用于 TDHEER, 表明了大间隔采样角度下重建的可行性, 并对比了 TDHEER 中 3 种不同算法的优缺点. 结果表明, SART 算法更适合重建本实验平台获取的高能电子图像. 但由于实验设置的原因, 例如束流不稳定性、成像采集过程和样品的安装位置以及可旋转平台的精度限制了最终的重建图像质量. 为了进一步优化 TDHEER, 需要研究束流稳定性, 样品准直和旋转平台精度. 此外通过将 SART 与基于总变分的算法结合使用, 可以改进 SART 算法以减少伪影 [30–32], 进而改善图像质量. 相信高能电子三维成像技术的实验验证能拓展 HEER 技术的应用领域, 尤其在中尺度科学领域中的应用.

感谢兰州大学李公平教授和张催博士在三维重建算法方面提供的帮助.

参考文献

- [1] Wei G, Qiu J, Jing C 2014 *Pro. SPIE* **9211** 921104
- [2] Zhao Y T, Zhang Z, Gai W, et al. 2016 *Laser Part. Beams* **34** 338
- [3] Merrill F, Harmon F, Hunt A, Mariam F, Morley K, Morris C, Saunders A, Schwartz C 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **261** 382
- [4] Zhao Q T, Cao S C, Cheng R, Shen X K, Zhang Z M, Zhao Y T, Gai W, Du Y C 2014 *Proceedings of the LINAC2014 Geneva, Switzerland, August 31–September 5, 2014* p76
- [5] Zhao Q T, Cao S C, Liu M, et al. 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **832** 144
- [6] Zhou Z, Du Y C, Cao S C, et al. 2018 *Phys. Rev. Accel. Beams* **21** 074701
- [7] Zhao Q T, Cao S. C, Cheng R, et al. 2018 *Laser Part. Beams* **36** 313

- [8] Zhao Q T, Cao S C, Shen X K, Wang Y R, Zong Y, Xiao J H, Zhu Y L, Zhou Y W, Liu M, Cheng R, Zhao Y T, Zhang Z M, Gai W 2017 *Laser Part. Beams* **35** 579
- [9] Zhou Z, Fang Y, Chen H, Wu Y P, Du Y C, Yan L X, Tang C X, Huang W H 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 034068
- [10] Maddox B R, Park H S, Remington B A, et al. 2011 *Phys. Plasmas* **18** 168
- [11] Park H S, Maddox B R, Giraldez E, et al. 2008 *Phys. Plasmas* **15** 3048
- [12] Tian C, Yu M H, Shan L Q, Wu Y C, Zhang T K, Bi B, Zhang F, Zhang Q Q, Liu D X, Wang W W, Yuan Z Q, Yang S Q, Yang L, Zhou W M, Gu Y Q, Zhang B H 2019 *Nucl. Fusion* **59** 046012
- [13] Higginson D P, Vassura L, Gugiu M, et al. 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 054802
- [14] Strobl M, Manke I, Kardjilov N, Hilger A, Dawson M, Banhart J 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 243001
- [15] Merrill F E, Bower D, Buckles R, et al. 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 051003
- [16] King N S P, Ables E, Adams K, et al. 1999 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **424** 84
- [17] Zhao Q T, Ma Y Y, Xiao J H, Cao S C, Zhang Z M 2019 *Appl. Sci.* **9** 3764
- [18] Xie Y G, Cheng C, Wang M, Lv J G, Meng X G, Wang F, Gu S D, Guo Y N 2003 *Particle Detector and Data Acquisition* (Beijing: Science Press) pp5–16 (in Chinese) [谢一冈, 陈昌, 王曼, 吕军光, 孟祥承, 王锋, 顾树棣, 过雅南 2003 粒子探测器与数据获取 (北京: 科学出版社) 第5—16页]
- [19] Padole A, Khawaja Rd Ali, Kalra M K, Singh S 2015 *Am. J. Roentgenol.* **204** 384
- [20] Chen B X, Yang M, Zhang Z, Bian J G, Han X, Sidky E, Pan X C 2014 *Biochim. Biophys. Acta* **1581** 1856
- [21] Schofield R, King L, Tayal U, Castellano I, Stirrup J, Pontana F, Earls J, Nicol E 2020 *J. Cardiovasc Comput Tomogr.* **14** 219
- [22] Gordon R, Bender R, Herman G T 1970 *J. Theor. Biol.* **29** 471
- [23] Trampert J, Leveque J J 1990 *J. Geophys. Res. B:Solid Earth* **95** 12553
- [24] Zhu Y L, Yuan P, Cao S C, et al. 2018 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **911** 74
- [25] Blackledge J M 2006 *Digital Signal Processing* (2nd Ed.) (Cambridge: Woodhead Press) pp522–540
- [26] Rafael C, Richard E, Steven L (translated by Ruan Q Q) 2014 *Digital Image Processing Using MATLAB* (2nd Ed.) (Beijing: Electronics Industry Press) pp45–48 (in Chinese) [拉斐尔C, 理查德E, 史蒂文L 著 (阮秋琦 译) 2014 数字图像处理 (MATLAB版) (第二版) (北京: 电子工业出版社) 第45—48页]
- [27] Vetterli M, Herley C 1992 *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process* **40** 2207
- [28] Zhang Y, Zhang W H, Lei Y J, Zhou J L 2014 *J. Opt. Soc. Am. A* **31** 981
- [29] Soleimani M., Pengpen T 2015 *Philos Trans. R. Soc. London, Ser. A* **373** 20140399
- [30] Sidky E Y, Kao C M, Pan X C 2009 *J. X-Ray Sci. Technol.* **14** 119
- [31] Liu Y, Ma J H, Fan Y, Liang Z R 2012 *Phys. Med. Biol.* **57** 7923
- [32] Deng L Z, Mi D L, He P, Feng P, Yu P W, Chen M Y, Li Z C, Wang J, Wei B 2015 *Bio-med. Mater. Eng.* **26** 1685

Experimental demonstration of three-dimensional high energy electron radiography*

Li Shuang-Shuang¹⁾²⁾ Zhao Quan-Tang^{2)3)†} Cao Shu-Chun²⁾³⁾

Ran Zhao-Hui²⁾ Shen Xiao-Kang²⁾³⁾ Zhao Shu-Jun^{1)‡} Zhang Zi-Min²⁾³⁾

1) (School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

2) (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

3) (School of Nuclear Sciences and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 12 April 2021; revised manuscript received 6 May 2021)

Abstract

High energy electron radiography (HEER) proposed first for real-time high spatial and temporal resolution diagnosis of warm dense matter (WDM) and inertial confinement fusion (ICF) has proved experimentally feasible for mesoscale sciences diagnosis. Until now, the spatial resolution of the images close to 1 μm has been reached experimentally which is better than that of X-rays and neutron radiography. However, traditional HEER obtains two-dimensional images which cannot accurately present the three-dimensional structure of the

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFA0404900), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875303), and the Key Program of the International Partnership of Bureau of International Cooperation Chinese Academy of Sciences (Grant No. 113462KYSB20160036).

† Corresponding author. E-mail: zhaquantang@impcas.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhaosj@zzu.edu.cn

sample. To further improve the capability of HEER to diagnose and obtain the internal information of samples, three-dimensional high energy electron radiography (TDHEER) was put forward by combining HEER with three-dimensional (3D) reconstruction tomography technology. The validity and usage of the TDHEER method have been confirmed through simulation of the fully 3D diagnostic of static mesoscale sample. This paper focuses mainly on the experimental demonstration of the 3D high energy electron radiography. The feasibility of TDHEER is for the first time confirmed by the results achieved with different 3D reconstruction algorithms. The 3D reconstruction algorithms, analytical algorithm-filtered back projection (FBP), iterative algorithms-algebraic reconstruction technique (ART), and simultaneous algebraic reconstruction technique (SART) are used here. In this experiment, the less projected data are used, so it takes the less time to obtain two-dimensional (2D) HEER images and the reconstruction. In order to spend the time as little as possible and obtain the satisfactory quality of reconstruction result, there are three groups of projected image sets, 180, 36 and 18, acquired in our experiment. When all three algorithms are adopted in 180 projected images, the reconstructed images show that all three algorithms FBP, ART and SART are feasible for TDHEER. The different reconstructed slice images of the sample in X -, Y -, and Z - direction clearly show the detailed structure of the sample. The images reconstructed by ART and SART algorithm are equivalent. Comparing with ART and SART, the reconstruction results by FBP can show more details, but there are some artifacts. Because the 36 2D HEER images fail to satisfy the Nyquist sampling theory, the analytic algorithm FBP is not used. Taking the result of FBP reconstructed by 180 images as a standard reference to compare the result of ART with the results of SART, the images reconstructed by the SART algorithm are closer to the original images. Testing 18 images, the results of the ART and SART both have lots of artifacts but the SART algorithm spends less time in reconstruction. As fewer projected images are used, more artifacts are found in the reconstructed images. Therefore, it is advantageous to combine the SART algorithm with 36 HEER projected images, which obtains high-quality reconstruction images and spends less time. The feasibility of TDHEER is confirmed experimentally for the first time and all three dimensions of the sample structures are obtained. Of the three different 3D reconstruction algorithms, the SART algorithm is the most suitable for reconstructing the few-view images. The TDHEER technology will extend HEER's application fields, especially for mesoscale sciences.

Keywords: high energy electron radiography, three-dimensional reconstruction algorithm, three-dimensional high energy electron radiography, mesoscale sciences

PACS: 42.30.Wb, 41.85.Ja, 41.75.-i, 07.78.+s

DOI: [10.7498/aps.70.20210686](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210686)