

高能电子成像研究进展

赵全堂¹, 张子民^{1,*}, 曹树春¹, 程锐¹, 申晓康¹, 杜应超², 赵永涛³

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000;

2. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 3. 西安交通大学理学院, 陕西西安 710049)

摘要: 本文通过蒙特卡罗程序 EGS 模拟研究了电子束与靶的相互作用, 对成像束流光学进行了设计, 并对束流匹配对空间分辨的影响、超快分束技术和产生横向均匀束技术等进行了模拟研究。实验验证了高能电子成像能达到 μm 量级的空间分辨, 并可实现厚度、密度分辨及明-暗场成像等特点。同时给出了后续实验及研究计划, 希望进一步提高高能电子成像性能并拓宽其应用领域。

关键词: 高能电子成像; 成像实验研究; 成像模拟研究; 束流调控

中图分类号: TL53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2019)09-1651-05

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0160

Status and Progress of High Energy Electron Radiography

ZHAO Quantang¹, ZHANG Zimin^{1,*}, CAO Shuchun¹, CHENG Rui¹,
SHEN Xiaokang¹, DU Yingchao², ZHAO Yongtao³

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The interaction between electron beam and target was studied by code EGS simulation. The imaging lens optics was designed and the effect of beam matching on the spatial resolution, ultrafast beam split and transverse uniform beam generation were studied. Through experimental study, the micrometer spatial resolution of high energy electron radiography (HEER) was reached and it could achieve target thickness and density resolutions, and bright-dark field imaging. Furthermore, the future plan of HEER program was shown in order to further improve the HEER technology and extend the HEER application filed.

Key words: high energy electron radiography; radiography experiment study; radiography simulation study; beam manipulation

收稿日期: 2019-03-18; 修回日期: 2019-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11505251, 11435015); 国际科技合作项目资助(S2016G9016)

作者简介: 赵全堂(1984—), 男, 甘肃武威人, 高级工程师, 博士, 核技术及应用专业

* 通信作者: 张子民, E-mail: zzm@impcas.ac.cn

网络出版时间: 2019-07-23; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190723.1039.006.html>

高能电子成像(HEER)技术于2013年底在国内首次由中国科学院近代物理研究所和清华大学工程物理系合作展开,首次提出了利用HEER技术对温稠密物质(WDM)和惯性约束聚变(ICF)进行实时的高时空分辨诊断^[1-2],目标是为在中国科学院近代物理研究所十二五规划中的大科学装置HIAF^[3]上开展高密度物理实验及重离子惯性约束聚变中的瞬态过程提供诊断方法。相对于X光照相、X光汤姆逊散射和质子照相等诊断方法,HEER具有显著优势:电子加速器造价相对较低,成像系统较小,易发展专门用于成像的装置;基于光阴极的ps脉宽的电子束技术已非常成熟,特别适合超快动态成像,可较好地应用在需要较高空间分辨和时间分辨的场合。本文就近年来本课题组在HEER关键技术及实验方面的研究进展进行总结,并给出后续研究计划及发展方向。

1 HEER 研究进展

HEER^[4]装置的基本布局如图1所示,其工作原理为:电子束从光阴极发射,经过加速、输运和调控后照射被诊断靶,电子束与靶物质

相互作用,经过碰撞、散射和透射后电子束的横向分布富含靶物质信息,利用具有一定放大倍数的点对点磁透镜成像系统,将通过靶物质后的电子束的横向分布信息在荧光屏上成像,通过所成的像获得被诊断靶的信息。HEER装置主要包括以下5个部分:高品质电子束(LINAC)、束运匹配段、电子束与靶物质、点对点磁透镜成像系统和像平面CCD相机。从2013年到2018年,HEER研究主要针对原理性验证实验及束运匹配段、成像透镜组设计等相关方面展开。

1.1 实验方面进展

2013年冬,在清华大学电子直线加速器上开展了首次HEER测试实验,束流能量为46.3 MeV、束团电荷量为100 pC、束斑直径为3 mm、束团长度为2 ps。成像透镜组由原有束线上的两个相距2.16 m的三透镜组组成,成像样品为TEM网格。首次成像实验结果如图2所示,空间分辨达10 μm量级^[5],实验获得的放大倍数与理论计算值一致。

为进一步开展HEER相关方面的实验研究且不影响其他实验,基于清华大学电子直线

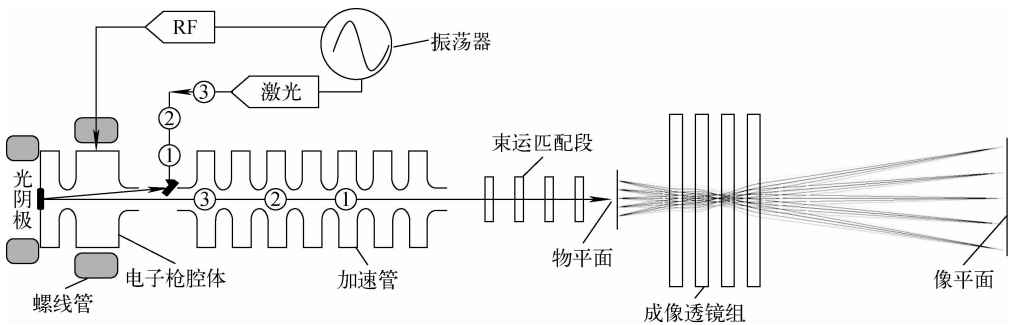
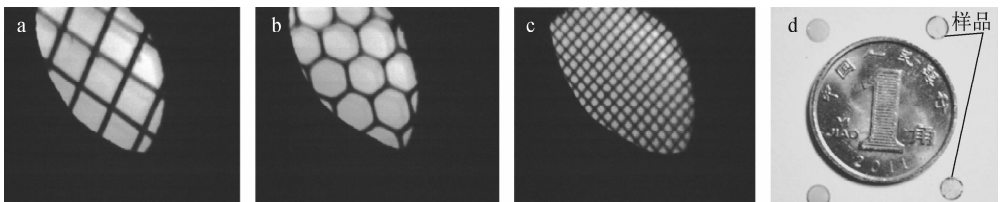


图1 HEER装置的基本布局

Fig. 1 HEER platform general layout



a——50目四边形 Ni; b——75目六边形 Cu;

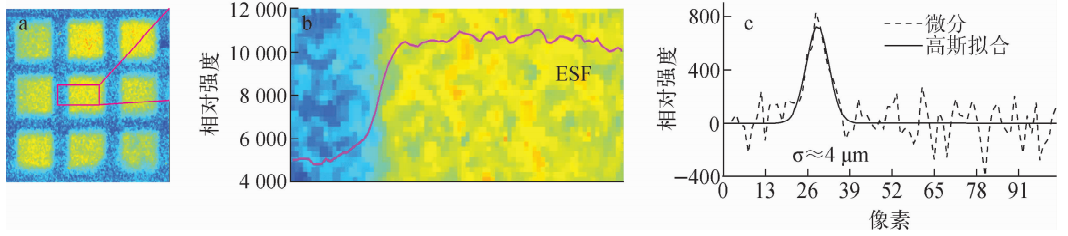
c——200目四边形 Au; d——TEM网格样品实际大小对比

图2 HEER实验结果

Fig. 2 HEER experimental result

加速器及实验室布局,设计并搭建了专用 HEER 束线。束流由消色散偏转系统 Achromat 偏转引出后照射放置在物平面的靶,然后由成像透镜组成像。该束线上包含两种放大倍数的成像透镜组,一组(8 块四极铁)放大倍数为 1 倍,另一组放大倍数为 2.88 倍(由前面 4 块四极铁组成),具体设计参数参见文献[6]。于 2016 年在该束

线上进行了相关实验,实验用束流能量为 45 MeV,束团长度为 10 ps,电荷量为 200 pC。200 目 TEM 网格成像结果及空间分辨分析如图 3 所示,空间分辨达 $4 \mu\text{m}$ 。在该束线上进行 $300\sim 600 \mu\text{m}$ 硅台阶靶的厚度分辨实验,分辨达 $10 \mu\text{m}$ 。同时利用选择大散角的透射电子实现暗场成像,具体实验结果参见文献[7]。



a——200 目 TEM 网格成像结果;b——图 a 方框内的边沿区域和沿 x 方向密度投影 ESF;c——图 b ESF 的微分和高斯函数拟合
图 3 200 目 TEM 网格成像结果及空间分辨分析

Fig. 3 200 mesh TEM grid HEER experiment result and spatial resolution analysis

1.2 模拟方面进展

利用蒙特卡罗程序 EGS 对电子束与靶物质相互作用进行模拟研究,用来指导高能电子成像实验设计。利用两个不同放大倍数的成像透镜组参数,模拟研究了束流匹配对成像空间分辨的影响。为消除成像透镜组部分二阶项对空间分辨的影响,要求打靶束流横向匹配。从模拟结果可直观给出束流匹配的重要性及束流匹配对成像的影响[6]。

根据面密度分辨前期实验,发现束流横向分布不均匀及束流不稳定性对成像结果分析带来很大困扰。实验测得的靶位置束流横向分布如图 4 所示。束流密度在横向和纵向的分布如图 5 所示,可看出,束流密度在横向和纵向分布极不均匀。从模拟方面进行了利用八极铁产生

横向均匀束的研究。两块八极铁置于束运匹配段,在靶位置产生横向均匀束,模拟结果如图 6 所示,具体设计及讨论参见文献[8]。

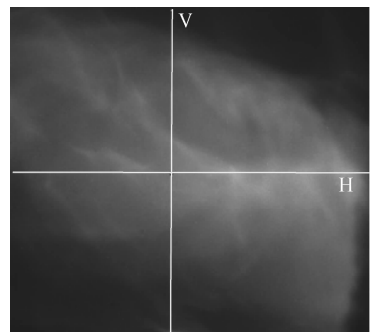


图 4 实验测得的靶位置束流横向分布
Fig. 4 Beam transverse distribution at target from experiment

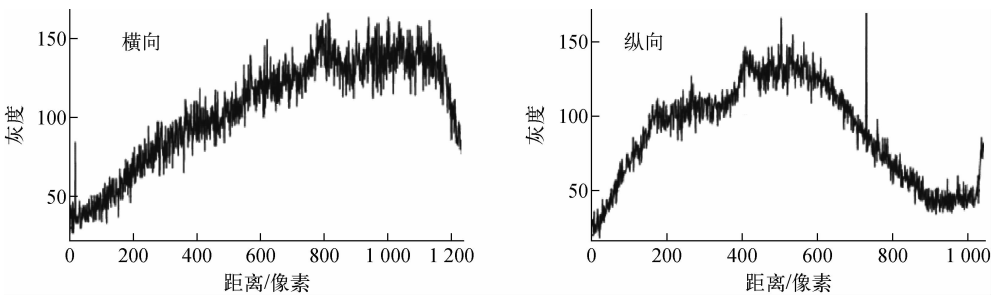


图 5 束流密度在横向和纵向的分布
Fig. 5 Horizontal and vertical distributions of beam intensity

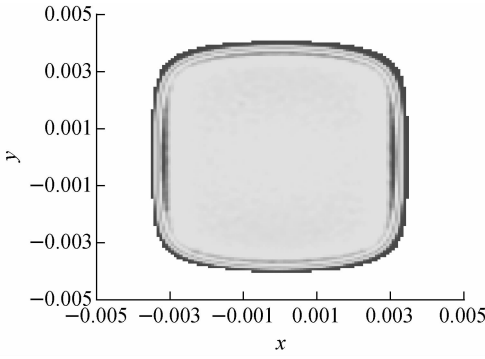


图6 模拟获得的横向均匀分布束
Fig. 6 Transverse distribution of uniform beam from simulation

3 GHz的横向偏转腔,可将束团间隔为 83.3 ps 整数倍的电子束在垂直方向分束,加入双切割铁可使分束结构更加紧凑,具体设计参数及模拟结果参见文献[9]。

2 HEER 后续研究计划

为深入开展 HEER 实验及应用方面的研究,设计了兰州 HEER 实验平台(50 MeV, S波段的电子直线加速器),基本布局如图8所示。该装置可提供的束流参数为:束团电荷量从 100 pC 到 nC 量级,重复频率 5~50 Hz 可调,分辨达到 μm 量级。该装置有两个电子枪,热阴极微波电子枪和光阴极微波电子枪,能量高达 50 MeV。其中,热阴极微波电子枪满足高平均流强、大电荷量及稳定束的静态实验需求,光阴极微波电子枪满足动态实验的高时间分辨需求。第1阶段采用热阴极微波电子枪注入方式,具体设计参数参考文献[10-11],目前正在安装调试中。在此平台上计划开展的实

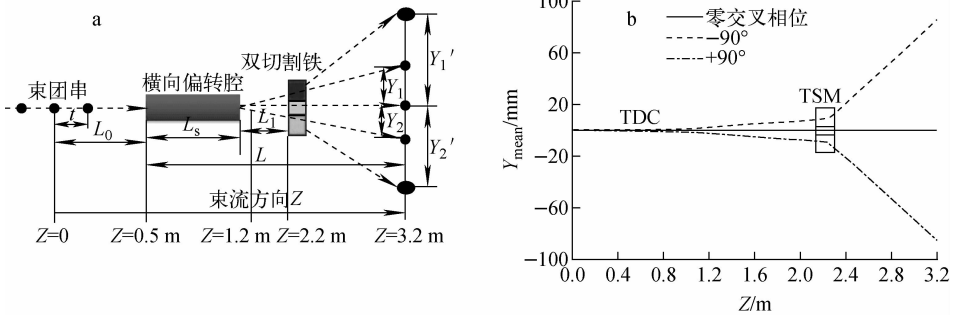


图7 超快三维分束模拟研究布局图(a)及模拟结果(b)

Fig. 7 Ultra-fast three-dimensional beam split simulation layout (a) and simulation result (b)

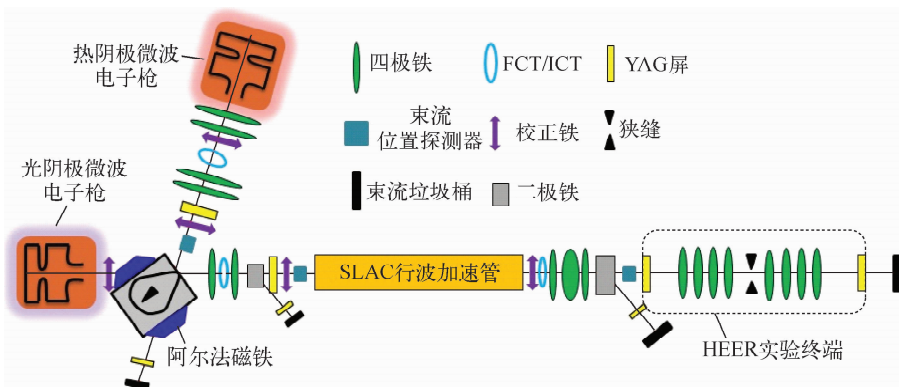


图8 兰州 HEER 实验平台布局及示意图

Fig. 8 Lanzhou HEER experimental platform layout and sketch map

验研究包括:高能电子对强激光与金属固体靶相互作用的超快动态成像实验,核材料辐照损伤离线诊断实验,电子与等离子体相互作用实验等。同时提出将兰州 HEER 装置与中国科学院近代物理研究所的低能量强流高电荷态重离子研究装置(LEAF)相结合,实现对核能材料辐照损伤的在线实时诊断研究。另外,为提升 HEER 诊断获取信息的能力,提出将 HEER 与计算机断层三维重建技术结合,实现样品三维成像诊断技术。通过本平台对 HEER 的研究,希望将 HEER 技术拓宽到其他学科的实验诊断研究应用中,如材料、化学、生物、物理等学科,为它们提供一强有力的诊断工具。

3 结论

本文对 HEER 相关技术的进展进行了总结,主要从实验和模拟研究两方面的进展进行了概述。目前已从实验方面验证了 HEER 技术能够实现高空间分辨 μm 量级,能够实现明-暗场成像且具有密度、厚度分辨的能力。从模拟方面给出了束流调控技术在 HEER 中的应用,包括束流匹配、产生横向均匀束及束团串超快分束等。同时给出了后续实验及研究计划,希望可促进这一强有力的诊断工具的发展,并能应用到其他相关领域。

参考文献:

- [1] GAI Wei, QIU Jiaqi, JING Chunuang. Electron imaging system for untrafast diagnostics of HEDLP[J]. SPIE Proceeding, 2014, doi: org/10.1117/12.2061952.
- [2] ZHAO Y, ZHANG Z, GAI W, et al. High energy electron radiography scheme with high spatial and temporal resolution in three dimension based on a e-LINAC[J]. Laser and Particle Beams, 2016, 34(2): 338-342.
- [3] 赵永涛,肖国青,李福利. 基于现代加速器的惯性约束聚变物理研究现状及发展[J]. 物理, 2016,45(2):98-107.
ZHAO Yongtao, XIAO Guoqing, LI Fuli. The physics of inertial confinement fusion based on modern accelerators: Status and perspectives[J]. Physics, 2016, 45(2): 98-107(in Chinese).
- [4] MERRILL F, HARMON F, HUNT A, et al. Electron radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 261(1-2): 382-386.
- [5] ZHAO Quantang, CAO Shuchun, CHENG Rui, et al. High energy electron radiography experiment research based on picosencond pulse width bunch[C]// Proceedings of Linac. [S. l]: [s. n], 2014.
- [6] ZHAO Q T, CAO S C, LIU M, et al. High energy electron radiography system design and simulation study of beam angle-position correlation and aperture effect on the images[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 832: 144-151.
- [7] ZHOU Z, DU Y C, CAO S C, et al. Experiments on bright-field and dark-field high-energy electron imaging with thick target material[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2018, 21: 074701.
- [8] ZHAO Q T, CAO S C, CHENG R, et al. Generation of uniform transverse beam distributions for high-energy electron radiography[J]. Laser and Particle Beams, 2018, 36(3): 313-322.
- [9] ZHAO Q T, CAO S C, SHEN X K, et al. Design and simulation study of ultra-fast beam bunches split for three orthogonal planes high energy electron dynamic radiography[J]. Laser and Particle Beams, 2017, 35(4): 579-586.
- [10] ZHU Yunliang, YUAN Ping, CAO Shuchun, et al. Design and simulation of a linac for high energy electron radiography research[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2018, 911: 74-78.
- [11] 周有为,曹树春,申晓康,等. 高能电子成像直线加速器低电平控制系统研制[J]. 原子能科学技术, doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0863.
ZHOU Youwei, CAO Shuchun, SHEN Xiaokang, et al. Development of low level radio frequency control system for electron linac of high energy electron radiography[J]. Atomic Energy Science and Technology, doi: 10.7538/yzk.2018.youxian.0863(in Chinese).