



·粒子束及加速器技术·研究快报·

9 MeV, 小于 0.1 mm 微焦点 X 射线源验证实验*

李 鹏, 王 建新, 肖德鑫, 周 征, 周 奎, 李世根, 劳成龙, 沈旭明,
闫陇刚, 刘 宇, 刘 捷, 胡栋才, 吴 岱, 杨兴繁, 黎 明

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 密度高、成像分辨率高、成像速度快的 X 射线数字成像检测需要高能微焦点大剂量 X 射线源, 高品质电子源是实现这一 X 射线源的关键手段。基于中国工程物理研究院太赫兹自由电子激光的主加速器, 验证了低发射度、低能散度的高亮度电子束实现高能微焦点的可行性, 得到电子束半高全宽尺寸小于 70 μm 的 9 MeV 微焦点, 并初步开展成像实验, 双丝像质计焦斑清晰分辨 9D 号丝, 丝直径 0.13 mm。

关键词: 微焦点; 高能 X 射线源; 高亮度电子源; 自由电子激光; 高能工业 CT

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200086

Verification experiment of micro focus X-ray source with energy 9 MeV and beam size less than 0.1 mm

Li Peng, Wang Jianxing, Xiao Dexin, Zhou Zheng, Zhou Kui, Li Shigen, Lao Chenglong, Shen Xuming,
Yang Longang, Liu Yu, Liu Jie, Hu Dongcai, Wu Dai, Yang Xingfan, Li Ming

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: High-density, high-resolution, and high-speed X-ray digital imaging detection requires a high-energy microfocus and high-dose X-ray source. A high quality electron beam source is the key means to achieve this X-ray source. Based on the main accelerator of the terahertz free electron laser of the China Academy of Engineering Physics (CTFEL), a high-energy microfocus X-ray source achieved by the high-brightness electron beam with low emittance and low energy spread was verified. The 9 MeV electron beam with full width at half-maximum of less than 70 μm was obtained. An initial imaging experiment was also carried out. The focal spot of the dual-wire image quality meter clearly distinguished the 9D wire with a wire diameter of 0.13 mm.

Key words: micro focus; high energy X-ray source; high brightness electron source; free electron laser; high energy industrial CT

高能工业 CT(Computed Tomography)对保障国防科技、航空、航天、核电等行业的大型构件和大型装备的质量与安全有重大应用价值^[1-2]。目前,高能工业 CT 系统射线源焦点尺寸为 1~2 mm,极大限制了空间分辨率、成像图像质量和尺寸测量精度,阻碍了其在高端装备上的应用。要在高于 9 MeV 能量下实现 X 射线源尺寸小于 0.1 mm 的“微焦点”,需要实现电子束聚焦到更小尺寸,电子束要求包括:(1)具有极佳方向性,即低发射度;(2)具有极好单色性,即低能散度;(3)此外,由于电子束的空间电荷力会引起横向膨胀,因此还需要较低峰值电流,在高亮度的前提下,峰值电流一般可放宽至 10 A 量级。

自由电子激光(FEL)一直是驱动高品质电子束发展的最主要需求,FEL 注入器的电子束可轻易满足高能微焦点需求。FEL 注入器的形式主要有光阴极注入器(LCLS^[3], EXFEL, LCLS-II 等)和热阴极注入器(SACLA^[4], FELIX 等)两种。通过模拟,这两种 FEL 注入器均可在纵向尺寸小于 3.5 m 下,实现 9~15 MeV、半高宽尺寸<0.1 mm、宏脉冲剂量 1 m 处>0.2 rad(重复频率 100 Hz),宏脉冲长度<50 μs 的高质量 X 射线源。

* 收稿日期:2020-03-29; 修订日期:2020-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(11975218, 11905210, 11805192);中国工程物理研究院创新发展基金项目(CX2019036, CX2019037)

作者简介:李 鹏(1984—),男,博士,助理研究员,从事加速器与自由电子激光研究;burnlife@sina.com。

通信作者:吴 岱(1986—),男,博士,副研究员,从事加速器与自由电子激光研究;wudai04@163.com。

近期中国工程物理研究院应用电子学研究所基于中物院太赫兹自由电子激光(CTFEL)装置^[5],开展了高品质电子源产生微焦点 X 射线源验证实验。CTFEL 电子束具有低发射度($<4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}@90 \text{ pC}$)和低能散度($<0.5\%$),利于聚焦;可高占空比($>10\%$)运行,利于实现高剂量。实验布局及测量结果如图 1 所示,其中电子束能量选取为 9 MeV,横向半高全宽尺寸通过 YAG 荧光屏测量约为 $66 \mu\text{m}$,横向抖动小于 $7 \mu\text{m}$,YAG 荧光靶与钨靶通过导入装置可保证位于同一 z 向位置。

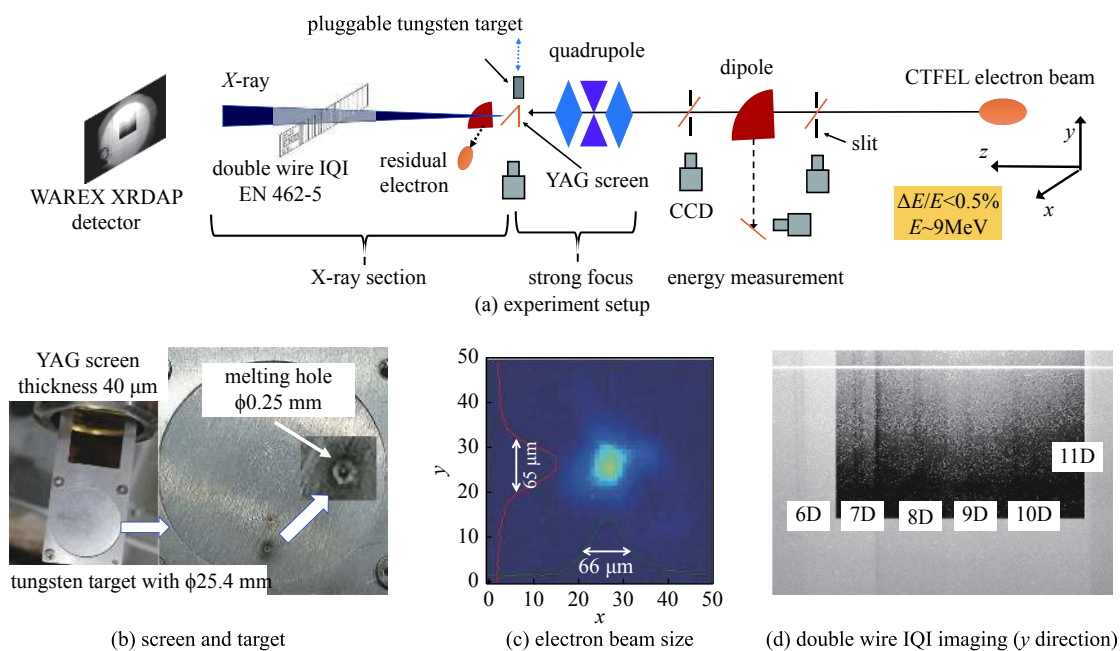


Fig. 1 Experiment results of the electron beam and the first X-ray imaging

图 1 电子束微焦点结果和首次 X 射线成像

为验证高亮度电子源打靶产生 X 射线成像效果,实验靶材采用 3 mm 厚钨,通过模拟可知靶厚引起的焦点展宽远小于 0.1 mm,由此可估算 X 射线源尺寸可小于 0.1 mm,但电子束微焦点仍引起了靶熔化(1 mA, 1 ms, 5 Hz, 工作 16 s),熔化孔直径约为 0.25 mm。使用双丝像质计进行了成像测试,采用 WAREX XRD 1622AP 探测器(像素尺寸 0.2 mm, 矩阵大小 2048×2048),放大比 4.5,积分时间 500 ms,图像 32 帧叠加,首次测试结果表明 y 方向能清晰分辨 9D 号丝(丝直径 0.13 mm)。由于实验中 X 射线硬度高于像质计常规应用,更细的丝易于被穿透,限制了分辨能力的精确测量,未来将针对高能微焦点 X 射线源焦点精确测量开展细致研究。

本实验验证了驱动自由电子激光的高品质电子束实现高能微焦点 X 射线源的可行性,为后续高能工业 CT 高端应用的小型化高能微焦点 X 射线源设计提供了验证平台和实验依据。下一步将安装用于 CTFEL 装置的旋转靶,提升高能微焦点射线测试能力,并完成基于常温光阴极注入器和热阴极注入器的高能微焦点 X 射线源物理与工程设计。

参考文献:

- [1] Yamaguchi K, Ohtake Y, Suzuki H, et al. Dimensional measurement of nuclear fuel pellets using high energy X-ray CT[C]//Proc of Non-Destructive Testing. 2016, 7: 1-7.
- [2] 焦晓静, 韩锋, 苏党帅. 用于核武器部件检查的新型 X 射线三维成像系统[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(11): 1418-1426. (Jiao Xiaojing, Han Feng, Su Dangshuai. A new computed tomography X-ray system to image nuclear weapon components[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(11): 1418-1426)
- [3] Emma P, Akre R, Arthur J, et al. First lasing and operation of an angstrom-wavelength free-electron laser[J]. Nature Photon, 2010, 4: 641-647.
- [4] Ishikawa T, Aoyagi H, Asaka T, et al. A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region[J]. Nature Photonics, 2012, 6: 540-544.
- [5] 黎明, 杨兴繁, 许州, 等. CAEP 太赫兹自由电子激光首次饱和出光[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 100101. (Li Ming, Yang Xingfan, Xu Zhou, et al. First lasing of CAEP THz free electron laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 100101)