



·粒子束及加速器技术·

## 10 MeV、 $>80$ Gy/s@1 m 的光子 FLASH 放疗射线源\*

单李军<sup>1</sup>, 周 征<sup>1</sup>, 羊奕伟<sup>1</sup>, 刘 宇<sup>1</sup>, 王建新<sup>1</sup>, 张德敏<sup>1</sup>, 肖德鑫<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>,  
闫陇刚<sup>1</sup>, 李 雷<sup>1</sup>, 曹传宇<sup>1</sup>, 张小丽<sup>1</sup>, 桑子儒<sup>1</sup>, 胥汉勋<sup>1</sup>, 王诗岚<sup>1</sup>, 程德琪<sup>2</sup>,  
唐镭迅<sup>3</sup>, 刘贤洪<sup>4</sup>, 何心坦<sup>4</sup>, 杨兴繁<sup>1</sup>, 王汉斌<sup>1</sup>, 甘孔银<sup>1</sup>, 吴 岱<sup>1</sup>,  
黎 明<sup>1</sup>, 陈门雪<sup>1</sup>, 胡进光<sup>1</sup>, 赵剑衡<sup>1</sup>, 范国滨<sup>5</sup>

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 哈尔滨 150001; 3. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 4. 中玖闪光医疗科技有限公司, 四川 绵阳 621000; 5. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 报道了基于常温射频直线加速器建成的 10 MeV 光子 FLASH 放疗射线源样机, 采用高平均电流电子束轰击高速旋转辐射转化靶, 在距离靶点 1 m 远处的固体水模内, X 射线剂量率达到 80.5 Gy/s, 达到未来临床实验与推广所需剂量率阈值。

**关键词:** FLASH 放疗; 超高剂量率; 医用直线加速器; X 射线源

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230412

## $>80$ Gy/s@1 m FLASH photon source at 10 MeV

Shan Lijun<sup>1</sup>, Zhou Zheng<sup>1</sup>, Yang Yiwei<sup>1</sup>, Liu Yu<sup>1</sup>, Wang Jianxin<sup>1</sup>, Zhang Demin<sup>1</sup>, Xiao Dexin<sup>1</sup>, Zhang Peng<sup>1</sup>,  
Yan Longgang<sup>1</sup>, Li Lei<sup>1</sup>, Cao Chuanyu<sup>1</sup>, Zhang Xiaoli<sup>1</sup>, Sang Ziru<sup>1</sup>, Xu Hanxun<sup>1</sup>, Wang Shilan<sup>1</sup>,  
Cheng Deqi<sup>2</sup>, Tang Leixun<sup>3</sup>, Liu Xianhong<sup>4</sup>, He Xintan<sup>4</sup>, Yang Xingfan<sup>1</sup>, Wang Hanbin<sup>1</sup>, Gan Kongyin<sup>1</sup>,  
Wu Dai<sup>1</sup>, Li Ming<sup>1</sup>, Chen Menxue<sup>1</sup>, Hu Jinguang<sup>1</sup>, Zhao Jianheng<sup>1</sup>, Fan Guobin<sup>5</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

4. Zhongjiu FLASH Radiotherapy Technology Co., Ltd. Mianyang 621900, China;

5. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A normal-conducting S-band linear accelerator based 10 MeV photon FLASH radiotherapy X-ray source prototype was built. By using high-energy, high average current electron beam hitting a rotating target, a high dose rate of 80.5 Gy/s at a source-axis distance of 1 m was successfully obtained, which reaches the threshold for future clinical trial.

**Key words:** flash radiotherapy, ultrahigh dose rate, linac, X-ray source

肿瘤放射治疗的终极目标是根除肿瘤的同时不对正常组织产生毒性反应。近年来,超高剂量率放射治疗(FLASH 放疗,又称“闪光放疗”、“闪疗”等)成为了放射治疗领域热门的话题之一,因为研究发现超高剂量率射线照射会显著减小正常组织毒性并维持肿瘤控制能力。一般来说,FLASH 放疗的超高剂量率阈值被认为 $>40$  Gy/s<sup>[1]</sup>,相比于目前常见的放疗方式提高了 2~4 个数量级。未来临床需求,一般要求射线源点到肿瘤位置的距离达到 1 m(源皮距或源轴距),以方便在二者之间添加准直器、均整器、多叶光栅等,并且还可针对常见病人体型维持治疗效果。

长期以来,高能 X 射线(6~10 MeV, 10 MeV 以上具有显著活化反应)的 FLASH 放疗备受期待,被誉为“物理

\* 收稿日期:2023-11-12; 修订日期:2023-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11975218, 12005211, 11805192, 11905210); 中国工程物理研究院创新发展基金项目(CX2019036, CX2019037)

联系方式:单李军, slj9864@sina.com。

通信作者:甘孔银, kygan60@hotmail.com;

王汉斌, hanbin1628@qq.com;

吴 岱, wudai04@163.com。

学的一小步, 癌症治疗的一大步”<sup>[2]</sup>。在以往的实验中, 中国工程物理研究院应用电子学研究所等单位, 采用拉近距离的方式(剂量率与距离平方成反比), 牺牲射野尺寸和纵向均一性, 达到 FLASH 放疗阈值, 并首次证明了高能 X 射线能够触发 FLASH 效应<sup>[3-4]</sup>。虽然国内外有类似的重复实验, 然而迄今为止, 达到临床需求的超高剂量率高能 X 射线源一直未能实现。

基于常温直线加速器技术路线, 研究团队建造了一台小型化 FLASH 射线源系统。该系统采用 S 波段加速器实现能量  $\leq 10$  MeV 的高能电子束, 并轰击高速旋转钨靶, 通过韧致辐射转化为超高剂量率 X 射线, 整体尺寸可保障现有医用直线加速器机房内空间可用。

采用 Ashland EBT3 胶片测量 SSD 为 80 cm 水模内 7 cm 水深处吸收剂量, 中心  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  范围内平均剂量率为 106 Gy/s, 根据 PDD 折算最大剂量率约 132 Gy/s。采用丙氨酸剂量计测量 SSD 为 100 cm 水箱内 10 cm 水深处吸收剂量率为 59.22 Gy/s ( $\pm 3.7\%$ ), 根据 PDD 外推至最大剂量点剂量率为 81.01 Gy/s。本装置首次达到了未来临床实验与推广所需剂量率阈值, 并且相对于国际通用阈值提高了一倍以上。FLASH 射线源系统实验结果如图 1 所示。

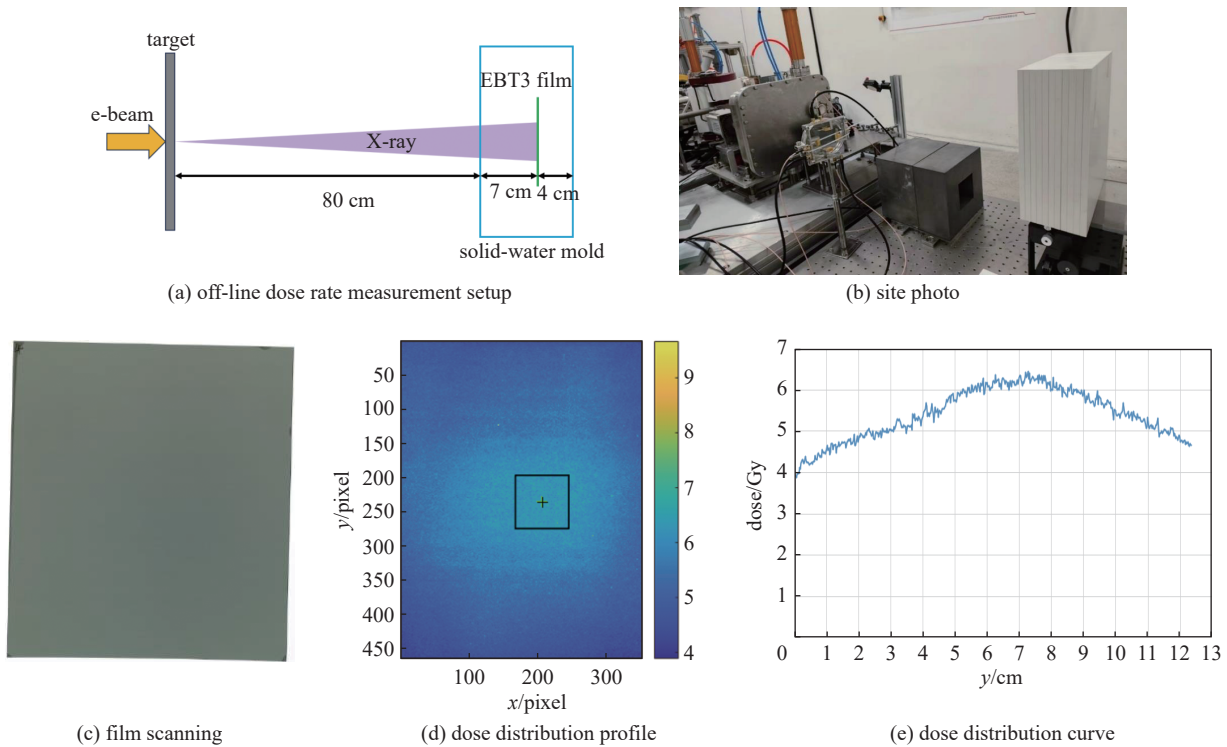


Fig. 1 Preliminary experimental results of the FLASH X-ray source

图 1 FLASH 放疗射线源系统初步实验结果

采用更高功率波源时, 该小型化 FLASH 放疗射线源尚有一倍设计余量, 其剂量率还有较大提升空间。下一步将向全社会开放, 结合已有的常规放疗加载手段, 构建独具特色的电子/X 射线的 FLASH 放疗临床前与临床实验平台。

#### 参考文献:

- [1] Vozenin M C, Bourhis J, Durante M. Towards clinical translation of FLASH radiotherapy[J]. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2022, 19(12): 791-803.
- [2] Pollard-Larkin J. FLASH Photon: One small step for physics, one huge leap for cancer therapy[R]. San Antonio, TX, USA: The University of Texas, 2019.
- [3] Gao Feng, Yang Yiwei, Zhu Hongyu, et al. First demonstration of the FLASH effect with ultrahigh dose rate high-energy X-rays[J]. *Radiotherapy and Oncology*, 2022, 166: 44-50.
- [4] Liu Focheng, Shi Jiaru, Zha Hao, et al. Development of a compact linear accelerator to generate ultrahigh dose rate high-energy X-rays for FLASH radiotherapy applications[J]. *Medical Physics*, 2023, 50(3): 1680-1698.