

# 高能 X 射线 FLASH 放射治疗: 基于低气压电离室的束流监视器物理及性能\*

赵继荣<sup>1)2)</sup> 羊奕伟<sup>2)5)†</sup> 张毅<sup>2)3)</sup> 王诗岚<sup>2)</sup> 冯松<sup>1)4)‡</sup>

1) (南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001)

2) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621000)

3) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

4) (先进核能技术设计与安全教育部重点实验室, 衡阳 421000)

5) (国家卫生健康委员会核技术医学转化重点实验室, 绵阳 621000)

(2025 年 3 月 2 日收到; 2025 年 4 月 10 日收到修改稿)

超高剂量率 X 射线 (简称 XFLASH) 的剂量实时准确监测在 XFLASH 放射治疗临床前后都起着关键作用. 本文研究了一种用于 XFLASH 放射治疗剂量在线监测的低气压电离室 (LPIC), 并将其作为 XFLASH 束流的监视器. 开展了电离室物理设计, 两个独立腔室分别放置高压极、收集极和保护极. 高压极与收集极电极间距为 1 mm, 腔室气压约 5 kPa. 实验分析了该监视器的坪曲线、剂量重复性、剂量线性等性能. 测试结果表明, 研制的低气压电离室表现出优异的剂量线性 ( $R^2 > 0.999$ ) 和剂量重复性 (变异系数小于 0.5%), 被证明是一种可靠的剂量监视器, 其性能满足国家标准对放射治疗剂量监视系统的要求.

**关键词:** FLASH 放射治疗, 低气压电离室, 束流监视器, 性能测试

**PACS:** 87.53.Bn, 87.53.Jw, 41.75.Fr

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250258

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250258

## 1 引言

以超高剂量率 (简称 FLASH, 通常  $\geq 40$  Gy/s) 进行的放射治疗在显著提升对正常组织保护的同时, 可以保持较高的肿瘤控制概率, 这种现象被称为“FLASH 效应”, 与之对应的超高剂量率放射治疗被称为“FLASH 放射治疗”<sup>[1-3]</sup>. X 射线 FLASH (简称 XFLASH) 放射治疗具有深穿透和经济性好等特点, 但在临床前和临床应用中面临诸多剂量学难题, 实现束流的精确在线监测是其中关键挑战之

一. 在常规放射治疗加速器中, 利用穿透电离室可实时监测和反馈束流的总剂量、剂量率、平整度、对称性等<sup>[4,5]</sup>. 在 FLASH 工况下, 由超高剂量率引起的电子-离子复合损失将使得穿透电离室的探测效率不稳定, 会随着剂量率和脉冲结构的改变出现显著变化, 难以对 XFLASH 束流进行准确的剂量测量与实时监测<sup>[6]</sup>.

目前, 基于闪烁探测器、金刚石探测器、穿透电离室已开展部分 FLASH 束流监视技术探索. Vignati 等<sup>[7]</sup> 开发了薄片型硅探测器作为 FLASH 监视器. Levin 等<sup>[8]</sup> 基于平板型闪烁体作为探测

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12375318, 12375296)、湖南省科技创新计划 (批准号: 2024RC3205) 和国家卫生健康委员会核技术医学转化重点实验室 (绵阳市中心医院) (批准号: 2021HYX021) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: winfield1920@126.com

‡ 通信作者. E-mail: fengs9115@gmail.com

器对 FLASH 加速器的束流进行监视, 探测器以 20000 Hz 帧率产生二维光束图像, 实现 FLASH 束流实时剂量监测与空间位置监测. 然而, 半导体和闪烁体会因辐照损伤造成类似电离室的饱和和非线性响应<sup>[9]</sup>. 此外 Marinelli 等<sup>[10]</sup>改进了 FlashDiamond 探测器 (TW60025), 实现了快速的信号传输并用于 FLASH 剂量监视, 但其探头较小, 不能提供束流在空间分布上的信息.

本研究使用低气压、窄间距电离室作为 XFLASH 放疗束流监视器. 基于 Boag 模型<sup>[11,12]</sup>可知, 降低电离室气压与电极间距均可有效抑制复合损失. 若使用低气压或窄间距电离室作为 XFLASH 束流监视器, 既可以避免传统穿透电离室由于复合损失引起的探测效率不稳定, 还可反映束流空间分布上的信息. 基于理论分析和数值模拟对低气压、窄间距电离室的电极间距和腔室气压等参数进行物理设计, 依据物理设计提供的数据进行工程设计, 研制了对应探测器并基于 XFLASH 加速器完成了详细的性能测试.

## 2 低气压电离室物理设计

在临床应用中, 用于 FLASH 束流监视器的低气压或窄间距电离室面临着双重挑战. 一方面, 需要设定合适的气压、电场强度以及电极间距, 以确保电子-离子复合损失处于可接受的范围之内; 另一方面, 必须保证束流具有足够的穿透性, 避免在正常治疗距离处出现单脉冲剂量过低、剂量率不足的情况. 因此, 在研制探测器之前, 有必要开展细致的电子-离子复合损失计算以及束流损失模拟.

### 2.1 电子-离子复合损失随电离室气压、电极间距、电压的变化关系

为了将电子-离子复合损失控制在可接受的范围, 研究了电离室气压、电极间距以及电压等 3 个关键因素与复合损失之间的联系, 用以精准确定电离室的气压、电极间距等关键参数.

从电离室的工作原理来看, 其工作过程可以清晰地划分为“辐射电离+电荷收集+采集分析”3 个主要阶段. 在 FLASH 工况下, 电离室出现非线性响应问题的主要阶段集中在“电荷收集”环节. 为了有效解决这一问题, 一是通过降低辐射电离过程中产生的电荷量, 减轻电荷收集阶段的压力; 二是提

升离子收集的性能, 优化电荷收集过程, 进而提高电荷收集的效率. 电离室的非线性响应与多种因素有关, 对应多种修正因子  $k_s$  模型公式, 其中 Boag 模型<sup>[11,12]</sup>是较为细致的一种, 其  $k_s$  的一阶近似表达式为

$$k_s = 1 + \frac{AQ_0(1-p)}{2}, \quad (1)$$

$$A = \frac{\alpha d^2}{e(\mu_+ + \mu_-)U_c V}, \quad (2)$$

其中,  $Q_0$  是腔内总电荷,  $A$  是腔气体因子,  $p$  是电子直接收集比例 (未形成负离子);  $d$  是极间距离,  $e$  是元电荷,  $\mu_+$  和  $\mu_-$  是正负离子的迁移率,  $V$  是腔内体积,  $U_c$  是收集电压,  $\alpha$  是正负电荷复合率常数. 理想情况下, 电荷收集效率应达到 100%, 即  $k_s = 1$ , 但实际上总会有部分电荷被复合抵消, 因此电离室追求的是 (1) 式的第 2 项 (定义为复合比  $R$ ) 足够小. 临床上期望复合比  $R$  小于 1%, 即边界工况为

$$R \leq 0.01, \quad (3)$$

又

$$R = \frac{AQ_0(1-p)}{2} = \frac{\alpha d^2 Q_0(1-p)}{2e(\mu_+ + \mu_-)U_c V}, \quad (4)$$

其中正负离子迁移率基本与气压成反比、与电场成正比, 因此  $R$  可进一步近似表达为

$$R = \frac{\alpha d^3 Q_0 P(1-p)}{2e(\mu_{+0} + \mu_{-0})U_c^2 V}, \quad (5)$$

其中,  $\mu_{+0}$  和  $\mu_{-0}$  分别代表某特定气压和电场强度下特定气体的正负离子迁移率常数,  $P$  为气压.

进一步地, 根据 Thomson 的研究表明<sup>[13]</sup>, 在 1013 hPa (标准大气压) 以下时, 复合因子  $\alpha$  与气压成正比. 同时, 也近似正比于电场  $E$ , 所以  $R$  进一步改写为

$$R = \frac{\alpha_0 d^3 Q_0 P^2(1-p)}{2e(\mu_{+0} + \mu_{-0})U_c^2 V}, \quad (6)$$

其中  $\alpha_0$  是某特定气压和电场强度下的离子复合系数, 是一个常数.  $Q_0$  是密闭腔室内总电荷, 等于电荷密度  $\rho$  乘以体积  $V$ , 所以

$$R = \frac{\alpha_0 d^3 \rho P^2(1-p)}{2e(\mu_{+0} + \mu_{-0})U_c^2}. \quad (7)$$

近似地, 电荷密度  $\rho$  正比于脉冲内剂量  $D$  和气压  $P$ , 因此

$$R = \frac{\alpha_0 d^2 \rho_0 D P^3 (1-p)}{2e(\mu_{+0} + \mu_{-0}) U_c}, \quad (8)$$

其中  $\rho_0$  是某特定脉冲内剂量和气压下产生的电荷密度, 是一个常数.

若自由电子比例近似为一个常数, 将所有常数集中成一个常数  $k$ , 则有

$$R = k \frac{d^2 D P^3}{U_c}, \quad (9)$$

其中

$$k = \frac{\alpha_0 \rho_0 (1-p)}{2e(\mu_{+0} + \mu_{-0})}. \quad (10)$$

因此, 当剂量率  $D$  较大时, 为使  $R$  足够小, 需要尽量小的电极间距  $d$ 、足够小的气压  $P$ 、足够大的电极间电压  $U_c$ .

## 2.2 关系验证

上述解析公式中运用了大量的近似处理, 为验证其准确性, 使用 Numerical-ks-calculator 程序<sup>[14]</sup>模拟分析了平板电离室电极间距、腔室气压、电离室高压等参数对复合损失修正因子  $K_s$  的影响. 该程序描述了电离室内电荷释放、输运及反应过程, 通过考虑载流子在电场中的形成、相互作用和运动, 计算电荷载流子密度的时间演化, 并输出电极的电荷收集效率, 以获得电子离子复合损失修正因子  $K_s$ . 程序的可调节输入参数为电离室电极间距、收集极直径、电离室极间电压、单位剂量产生的电荷量、电子离子迁移率等.

本研究中, 模型采用平板型电离室, 电极间距设置为 1 mm, 电极直径为 11 mm, 根据模拟条件设置不同的剂量与电离室极间电压, 根据气压调整单位剂量产生的电荷量、电子离子迁移率等.

关于复合比  $R$  与气压  $P$  之间的关系验证, 模拟条件为单脉冲剂量 1.1 Gy, 极间距 0.1 mm, 电压 40 V 工况下, 气压为 0.0008—0.6 atm ( $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) 时, 复合比  $R$  与气压  $P$  的关系如图 1 所示. 通过对模拟数据的分析和处理, 得到复合比  $R$  与气压  $P$  拟合公式为  $R = 0.2256P^3$ , 拟合决定系数  $R^2 = 0.97385$ .

关于电压  $U_c$  对复合比  $R$  的影响, 设置单脉冲剂量为 1.11 Gy, 极间距 2 mm, 气压 0.005 atm. 当电压从 30 V 变化至 500 V 时, 复合比  $R$  与电压  $U_c$  的关系如图 2 所示, 复合比  $R$  与气压  $P$  的拟合公式为  $R = 0.05342U_c^{-1}$ , 拟合决定系数  $R^2 = 0.99713$ .

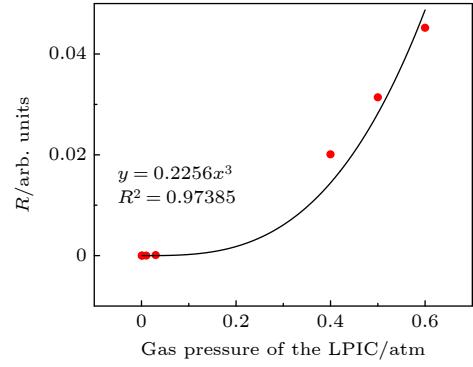


图 1 复合损失比  $R$  与 LPIC 腔室气压关系

Fig. 1. Relationship between  $R$  and gas pressure of the LPIC.

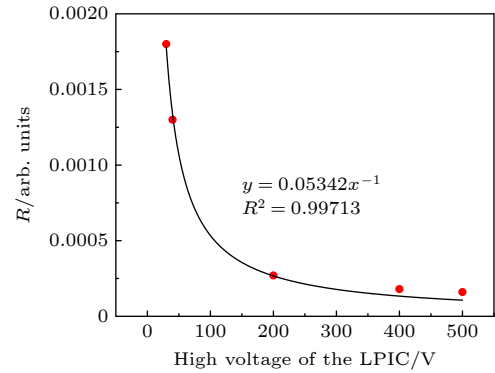


图 2 复合损失比  $R$  与 LPIC 高压关系

Fig. 2. Relationship between  $R$  and high voltage of the LPIC.

为验证复合比  $R$  与极间距  $d$  之间的关系, 设置单脉冲剂量为 82 Gy, 电压 400 V, 气压 0.003 atm. 当极间距  $d$  从 0.08 mm 变化至 12 mm 时, 复合比  $R$  与间距  $d$  的关系如图 3 所示, 复合比  $R$  与间距  $d$  的拟合公式为  $R = 0.00548d^2$ , 拟合决定系数  $R^2 = 0.99828$ .

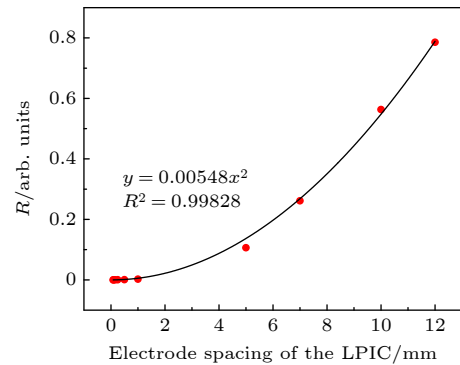


图 3 复合损失比  $R$  与 LPIC 电极间距关系

Fig. 3. Relationship between  $R$  and electrode spacing of the LPIC.

以上模拟中, 复合比  $R$  与电极间距  $d$ 、电离室高压  $U_c$  的拟合优于复合损失比  $R$  与腔室气压

$P$  的拟合, 原因可能是在 2.1 节的公式推导中, 与气压  $P$  相关的近似共有三次. 其中, 在推导 (5) 式时, 正负离子迁移率被近似正比于气压  $P$ ; 推导 (6) 式时, 复合因子  $\alpha$  根据经验公式被假设与气压  $P$  成正比; 推导 (8) 式时, 假设了电荷密度  $\rho$  正比于气压  $P$ . 因此, 这三次近似可能影响了 (9) 式的准确性. 经过与数值模拟的对比, 可以认为推导的关系式可以用于定性分析, 而电离室具体腔室气压和电极间距参数依然需要通过数值模拟确定.

### 2.3 降低复合损失的方法

模拟结果显示, 在电极间距 0.1 mm, 单脉冲剂量 1.1 Gy 情况下, 电离室气压小于 0.3 atm 才能使得复合损失小于 1%, 若电离室气压为标准大气压, 则要求电极间距小于 0.1 mm. 若仅使用减小极间距的方式降低复合损失, 电极间距小于 0.1 mm 的要求不仅在工程上难以实现, 同时工作过程中任何微小的温度、震动、材料老化等影响都可以造成电极间空间的显著变化, 从而显著影响电离室收集电荷和剂量之间的关系 (nC/Gy), 使得监视器的稳定性较差. 因此不宜通过单一调整极间距  $d$  来降低复合率.

此外, (9) 式显示通过大幅度增大高压的方式也可以降低复合率, 但由于电压过高、电场过强时, 会产生碰撞电离, 使得离子、电子数目增大, 输出信号随着电压增大急剧上升. 此时, 输出信号与剂量的关系变得复杂且十分不稳定. 因此, 通过大幅提升电压来降低复合率这种方法的适用范围也十分有限.

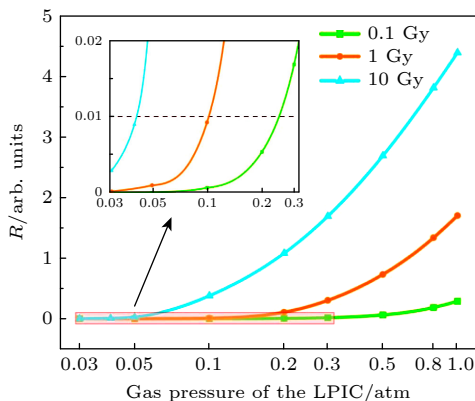


图 4 不同单脉冲剂量下复合损失比  $R$  与 LPIC 腔室气压之间的关系

Fig. 4. The relationship between  $R$  and gas pressure of the LPIC under different single pulse doses.

综上可知, 减小气压是减小电子离子复合比的最优方案, 具有很强的可行性. 根据 XFLASH 加速器工况及监视器所处位置的不同, 该监视器处的单脉冲剂量在 0.1—10 Gy/pulse 之间. 电极间距为 1 mm 时, 不同单脉冲剂量与气压的关系如图 4 所示. 为使复合比  $R$  小于 0.01, 当单脉冲剂量分别为 0.1, 1, 10 Gy 时, LPIC 腔室气压应分别小于 0.2, 0.1, 0.04 atm.

### 2.4 电离室薄窗对射线穿透率的影响

XFLASH 放疗要求加速器提供超高剂量率束流. 电离室可能会阻挡并散射束流, 从而降低治疗过程中远端生物组织的吸收剂量率. 为了确保正常治疗距离处获得足够的剂量率, 针对低压电离室在 XFLASH 束条件下的穿透特性进行计算与优化. 利用 MCNP 模拟 LPIC 出射窗与入射窗材料、厚度对 XFLASH 射束穿透性的影响. 模拟中, 改变束窗的厚度和材料, 厚度范围为 0—1000  $\mu\text{m}$ , 材料为钛 (Ti)、铝 (Al) 和铍 (Be). 定义不同束窗与零厚度束窗导致的该剂量之比为透过率  $T_r$ . 如图 5 所示, 随着窗厚的增大, 透过率接近直线下降, 且 Be 好于 Al, Al 好于 Ti, 说明高原子序数材料对射线的阻止本领较强. 总体上, 3 种材料在 0—1 mm 的窗厚下均有较好的穿透性.

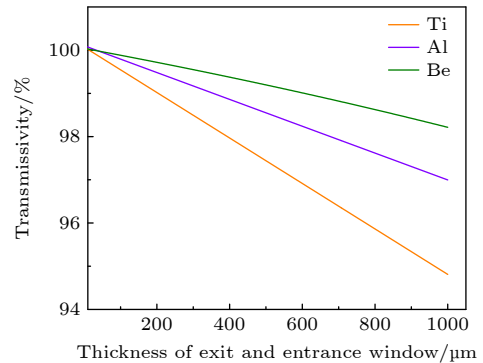


图 5 LPIC 窗厚与射束透射率关系

Fig. 5. Relationship between transmissivity and the LPIC window thickness.

## 3 性能测试与分析

基于低压电离室的物理设计研制了原理样机, 并按照国家标准 GB/T 15213—2016 中关于剂量监测系统相关要求在 XFLASH 加速器上开展测试, 以验证其是否符合物理设计和满足临床需求.



XFLASH 加速器由中玖闪光医疗科技有限公司研制, 能稳定产生能量高达 10 MeV 高能电子束. 当高能电子束轰击钨靶时, 通过轫致辐射可以产生满足 FLASH 放疗需要的 X 射线. 在距离钨靶约 100 cm 处, 其平均剂量率可达 80 Gy/s. 低气压电离室及 XFLASH 实验台如图 6 所示.

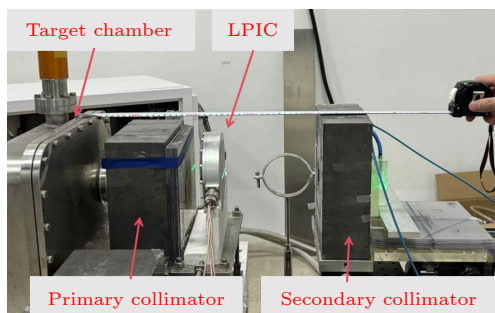


图 6 XFLASH 加速器实验台及低气压电离室实物图  
Fig. 6. Physical image of the XFLASH accelerator experimental setup and LPIC.

### 3.1 坪曲线测试

在 XFLASH 射束辐照下测量了低压电离室的特性曲线 [15]. 加速器在固定工况下运行, 调节 LPIC 的极间电压从 5—200 V, 测量监视器电流. 测量结果如图 7 所示. 坪特性曲线未展现明显的平台区域, 但仍然表现出信号随电压单调增大的趋势, 且当 LPIC 高压大于 40 V 时较为平坦. 当高压大于 40 V 时, 该坪曲线相对变化率均小于 0.002  $\mu\text{A}/\text{V}$ , 所用高压电源电压精度为 0.2%, 因此在 40—200 V 范围内, 由电压稳定性引起信号电流相对波动最大值为 0.069%, 远小于监视器总不确定度要求, 可忽略. 实际应用场景中, 若电离室电压具有良好稳定性, 则低气压电离室在相对剂量测量方面具有足够的可靠性.

### 3.2 重复性

依据国标 GB/T 15213-2016 中对医用 X 加速器剂量监视系统的相关要求, 对低压电离室进行剂量重复性测试. 剂量重复性由变异系数  $S$  表征, 如 (11) 式所示:

$$S = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{R} - R_i)^2}{n-1}} \times 100\%, \quad (11)$$

其中,  $R_i$  为剂量监测计数与剂量之比,  $\bar{R}$  为  $R_i$  的均值.

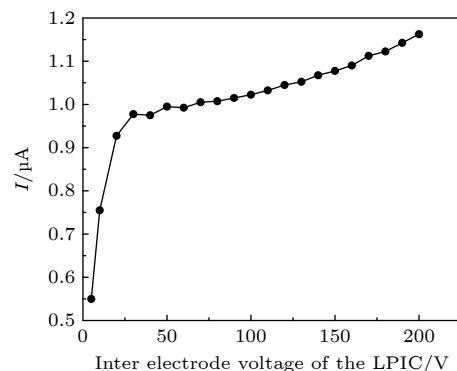


图 7 LPIC 的坪响应曲线  
Fig. 7. Plateau curve of the LPIC.

按测试要求, FLASH 加速器以 10—250 Gy/s 的剂量率发射相同数量的宏脉冲. LPIC 测得值为其产生信号的电荷积分, 单位为 MU. 使用 TW60019 作为剂量监视器. 测试结果如图 8 所示. 图 8 中 10—250 Gy/s 剂量率下变异系数  $S$  分别为 0.49%, 0.27%, 0.33%, 0.25%, 0.32%, 均小于 0.5%, 满足国标 GB/T 15213-2016 中对加速器剂量监视系统重复性的要求 [16,17].

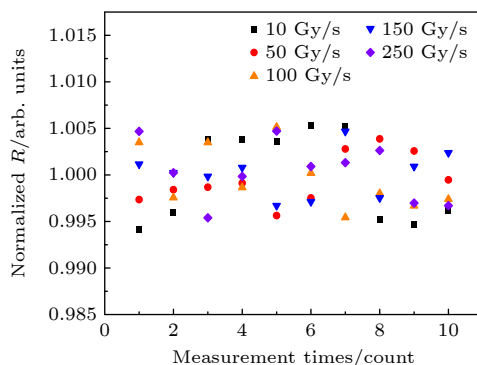


图 8 重复性测量中归一到平均值的  $R_i$   
Fig. 8. Normalized ratios of dose measurements using the LPIC to a reference.

### 3.3 剂量线性及剂量率线性

剂量线性主要研究监视器输出剂量 (MU) 与实际受照剂量率 (Gy) 之间的线性关系. 同理, 剂量率线性主要研究监视器输出剂量率 (MU/s) 与实际受照剂量率 (Gy/s) 之间的线性关系. 监视器的输出剂量率可通过监视器给出的跳数 MU 与曝光时间  $T_1$  相除得到. 实际受照剂量率则由监视器位置的剂量测量值  $D$  来确认. 在实际实验中, 通过在监视器后方放置主动式剂量计测量剂量计处的剂量值  $D_1$ , 继而通过之前测定的剂量转换关系  $K = D/D_1$  配合每次测量的  $D_1$  值, 从而得到  $D$  值.

为全面获取剂量率线性情况, 使用两种方式改变剂量率: 调整宏脉冲重频和宏脉冲宽度. 通过拟合不低于 5 个测量点得到线性相关系数 [18,19].

将 PTW60019 金刚石剂量计探头安装在监视器后端次级准直器 (3 cm×4 cm) 后, SSD 约 50 cm, 水深 3 cm. 剂量线性测量时, 固定脉宽与频率, 加速器出束不同剂量, 统计 LPIC 及 PTW60019 的测量结果. 实验结果如图 9(a), (b) 所示. 在所有测试条件下, 剂量与测量的脉冲计数之间具有高度线性关系, 决定系数 ( $R^2 > 0.999$ ) 证明剂量监视系统能够准确反映剂量.

根据 XFLASH 加速器出束原理, 可以通过改

变脉冲频率及脉冲宽度改变剂量率. 剂量率线性测量时, 分别在仅改变频率与仅改变脉宽的条件下测量. 测试时, 首先使 XFLASH 加速器固定宏脉冲宽度, 改变重频, 每次出束相同剂量, 统计 LPIC 与 PTW60019 的测量结果, 结果如图 10(a), (b) 所示. 其次, XFLASH 加速器固定重频, 仅改变宏脉冲宽度, 统计 LPIC 与 PTW60019 的测量结果, 结果如图 10(c), (d) 所示. 由图 10 可知, LPIC 在 FLASH 加速器常用频率及宏脉冲宽度范围内有良好的剂量率线性 ( $R^2 > 0.999$ ), 最大相对残差小于 0.02%, 远低于相关国家标准规定的  $\pm 2\%$  容许范围, 进一步验证了设备的可靠性, 满足临床应用需求.

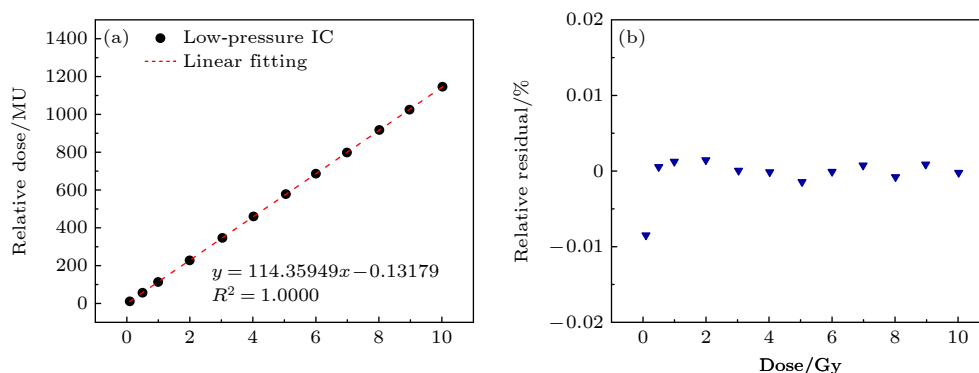


图 9 LPIC 的剂量线性

Fig. 9. Dose linearity of the LPIC.

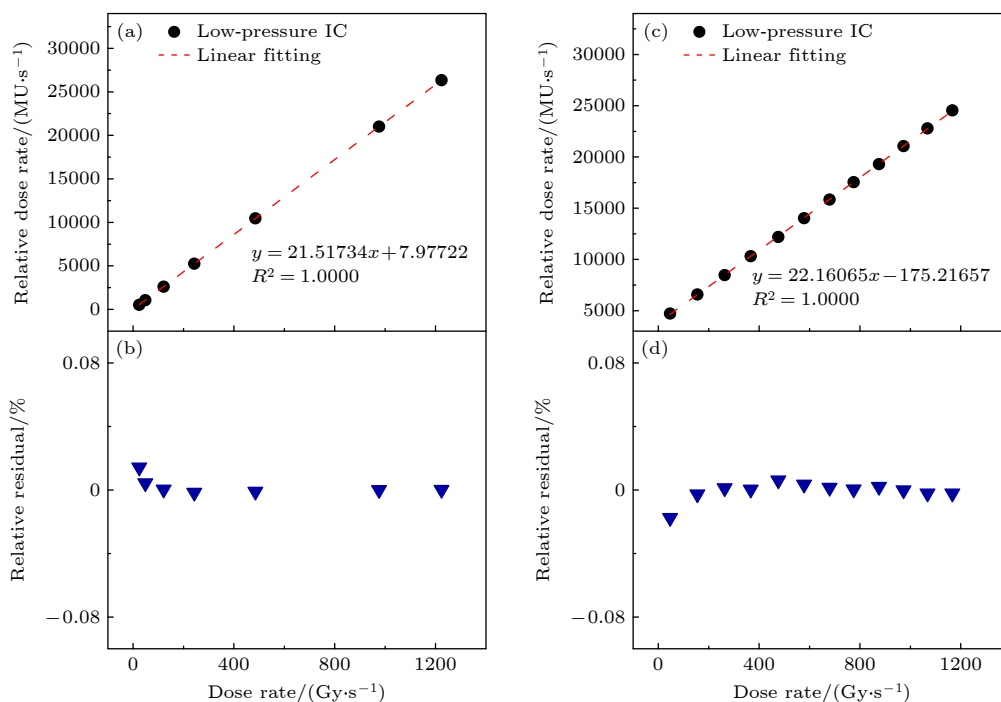


图 10 LPIC 剂量率线性

Fig. 10. Dose rate linearity of the LPIC.

综上所述, 低压电离室表现出优异的剂量线性及剂量率线性, 并完全符合剂量监测系统的相关国家标准. 这些研究结果表明其能够胜任 XFLASH 束流的实时监测, 并具备在临床实践中推广应用的潜力<sup>[20,21]</sup>.

## 4 总 结

本研究提出了一种用于 XFLASH 放射治疗束流监测的低压电离室, 深入开展了电离室腔室气压、电极间距等关键参数的物理设计. 基于设计研制了低压电离室工程样机, 利用 XFLASH 加速器进行了系统的性能测试, 并从剂量重复性、剂量线性以及剂量率线性等方面展开了深入的分析与评价. 研究结果表明, 低压电离室在剂量重复性、剂量线性和剂量率线性方面均展现出优良的性能, 能够精准且实时地实现对 XFLASH 束流参数的监测, 满足相关国家标准要求, 具备应用价值.

综上所述, 低气压电离室在超高剂量率辐照过程中能够在无显著饱和效应的情况下实现对束流的实时监测, 使其成为 XFLASH 放射治疗实时束流监测的有效工具, 为 XFLASH 放射治疗技术在临床应用中的进一步推广与发展提供坚实的技术支撑.

## 参考文献

- [1] Diffenderfer E, Verginadis I, Michele M K, Shoniyozov K, Velalopoulou A, Goia D, Putt M, Hagan S, Avery S, Teo K, Zou W, Lin A, Swisher-McClure S, Koch C, Kennedy A, Minn A, Maity A, Busch T, Dong L, Koumenis C, Metz J, Cengel K 2020 *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* **106** 440
- [2] Sørensen B S, Sitarz M K, Ankjærgaard C, Johansen J, Andersen C E, Kanouta E, Overgaard C, Grau C, Poulsen P 2022 *Radiother. Oncol.* **167** 109
- [3] Sørensen B S, Sitarz M K, Ankjærgaard C, Johansen Jacob Claus G, Andersen E, Kanouta E, Grau C, Poulsen P 2022 *Radiother. Oncol.* **175** 178
- [4] Böhlen T T, Germond J, Petersson K, Ozsahin E M, Herrera F G, Bailat C, Bochud F, Bourhis J, Moeckli R, Adrian G, Bailat C, Bochud F, Bourhis J, Moeckli R, Adrian G, 2023 *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* **117** 1007
- [5] Zhang Q X, Gerweck L E, Cascio E, Yang Q Y, Huang P G, Niemierko A, Bertolet A, Nesteruk K P, McNamara A, Schuemann J 2023 *Phys. Med. Biol.* **68** 055010
- [6] Romano F, Bailat C, Ferretti C, Jorge P G, Lerch M L F, Darafsheh A 2022 *Med. Phys.* **49** 4912
- [7] Vignati A, Giordanengo S, Federico F, Villarreal O A M, Milian F M, Mazza G, Shakarami Z, Cirio R, Monaco V, Sacchi R 2022 *Front. Phys.* **8** 375
- [8] Levin D, Friedman P, Ferretti C, Ristow N, Tecchio M, Litzenberg D, Bashkurov V, Schulte R 2024 *Med. Phys.* **51** 2905
- [9] Ai Z H 2008 *M. S. Thesis* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [艾自辉 2008 硕士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [10] Marinelli M, Martino F D, Sarto D D, Pensavalle J H, Felici G, Giunti L, Liso V D, Kranzer R, Verona C, Rinati G V 2023 *Phys. Med. Biol.* **68** 175011
- [11] Boag J W, Hochhuser E, Balk O A 1996 *Phys. Med. Biol.* **41** 885
- [12] Di Martino F, Giannelli M, Traino A C, Lazzeri M 2005 *Med. Phys.* **32** 2204
- [13] Petersson K, Jaccard M, Germond J, Buchillier T, Bochud F, Bourhis J, Vozenin M, Bailat C 2017 *Med. Phys.* **44** 1157
- [14] Gotz M, Karsch L, Pawelke J, Gotz M, Karsch L, Pawelke J 2017 *Phys. Med. Biol.* **62** 8634
- [15] Greening J R 1954 *Br. J. Radiol.* **27** 163
- [16] Rathore R K S, Munshi P, Bhatia V K, Pandimani S 1988 *Nucl. Eng. Des.* **108** 375
- [17] Rinati G V, Felici G, Galante F, Gasparini A, Kranzer R, Mariani G, Pacitti M, Prestopino G, Schüller A, Vanreusel V, Verellen D, Verona C, Marinelli M 2022 *Med. Phys.* **49** 5513
- [18] Schüler E, Acharya M, Montay-Gruel P, Loo B W, Vozenin M C, Maxim P G 2022 *Med. Phys.* **49** 2082
- [19] Siddique S, Ruda H E, Chow J C L 2023 *Cancers* **15** 3883
- [20] Esplen N, Mendonca M S, Bazalova-Carter M 2020 *Phys. Med. Biol.* **65** 23TR03
- [21] Vanreusel, Gasparini A, Galante F, Mariani G, Pacitti M, Cociorb M, Giammanco A, Reniers B, Reulens N, Shonde T B, Vallet H, Vandenbroucke D, Peeters M, Leblans P, Ma B, Felici G, Verellen D, Nascimento L D F 2022 *Phys. Medica.* **103** 127

# High-energy X-ray FLASH radiotherapy: Physics and performance study of beam monitoring based on low-pressure ionization chambers<sup>\*</sup>

ZHAO Jirong<sup>1)2)</sup> YANG Yiwei<sup>2)5)†</sup> ZHANG Yi<sup>2)3)</sup>

WANG Shilan<sup>2)</sup> FENG Song<sup>1)4)‡</sup>

1) (School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2) (Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

3) (School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

4) (Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy Technology Design and Safety, Ministry of Education, Hengyang 421000, China)

5) (NHC Key Laboratory of Nuclear Technology Medical Transformation, Mianyang 621000, China)

( Received 2 March 2025; revised manuscript received 10 April 2025 )

## Abstract

This study solves the key challenge of real-time beam monitoring in ultra-high dose rate X-ray FLASH (XFLASH) radiotherapy, in which the traditional ionization chambers suffer serious electron-ion recombination losses at extreme dose rates ( $\geq 40$  Gy/s). We propose a low-pressure ionization chamber (LPIC) as a novel beam monitor to achieve accurate dose measurement while maintaining beam penetration characteristics required for clinical applications. The LPIC is designed to have two independent chambers to accommodate high-voltage, collecting, and protecting electrodes. Key parameters include a 1-mm electrode gap and a reduced chamber pressure ( $\sim 5$  kPa) to mitigate recombination effects. Theoretical analysis based on the Boag model and numerical simulations (using the numerical-ks-calculator program) quantifies the dependence of recombination loss on pressure ( $P$ ), electrode spacing ( $d$ ), and voltage ( $U_c$ ). MCNP simulations evaluate X-ray transmission through chamber windows (Be, Al, Ti) with thickness up to 1000  $\mu\text{m}$ . According to the national standards (GB/T15213-2016), a prototype LPIC is constructed and tested on a 10-MeV XFLASH accelerator (dose rate: 80 Gy/s) for plateau characteristics, dose repeatability, linearity, and dose-rate response. Theoretical analysis based on the Boag model reveals that the values of recombination ratio  $R$  scale with  $P^3$ ,  $d^2$ , and  $U_c^{-1}$ , which are validated by numerical simulations ( $R = 0.2256P^3$ ;  $R = 0.0534U_c^{-1}$ ;  $R = 0.00548d^2$ ). At 1.1 Gy/pulse, recombination losses are maintained below 1% at the optimal parameters:  $P < 0.3$  atm for  $d = 0.1$  mm or  $P < 0.04$  atm for  $d = 1$  mm. MCNP simulations show that X-ray transmission exceeds 90% for beryllium (Be), aluminum (Al), and titanium (Ti) windows with thickness  $\leq 1000$   $\mu\text{m}$ . While 0.1-mm Be achieves the highest transmission ( $> 99\%$ ), 1-mm Al (transmission  $\sim 95\%$ ) is selected as the optimal window material due to its clinical acceptability ( $< 5\%$  dose loss), cost-effectiveness, and easy fabrication. The prototype exhibits stable plateau characteristics ( $\Delta I/I < 0.069\%$  at  $U_c > 40\text{V}$ ), exceptional dose repeatability (coefficient of variation  $< 0.5\%$  across 10–250 Gy/s), and linearity ( $R^2 > 0.999$  for dose and dose-rate measurements). These results confirm their compliance with the national standard (GB/T15213-2016) and are suitable for real-time XFLASH

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12375318, 12375296), the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (Grant No. 2024RC3205), and the NHC Key Laboratory of Nuclear Technology Medical Transformation (Mianyang Central Hospital), China (Grant No. 2021HYX021).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [winfield1920@126.com](mailto:winfield1920@126.com)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [fengs9115@gmail.com](mailto:fengs9115@gmail.com)



monitoring. The LPIC demonstrates robust suppression of recombination losses and reliable performance under XFLASH conditions. Its design, which is optimized via theoretical modeling and simulations, ensures high precision, which meets GB/T15213-2016 requirements, while preserving beam penetration. The use of 1-mm Al windows balances cost and function, making the LPIC a reliable clinical dose monitor. Future studies will focus on multi-channel LPIC arrays for two-dimensional beam profiling.

**Keywords:** FLASH radiotherapy, low-pressure ionization chamber, beam monitor, performance testing

**PACS:** 87.53.Bn, 87.53.Jw, 41.75.Fr

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250258](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250258)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250258](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250258)

## 高能X射线FLASH放射治疗：基于低气压电离室的束流监视器物理及性能

赵继荣 羊奕伟 张毅 王诗岚 冯松

### High-energy X-ray FLASH radiotherapy: Physics and performance study of beam monitoring based on low-pressure ionization chambers

ZHAO Jirong YANG Yiwei ZHANG Yi WANG Shilan FENG Song

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 148704 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250258

CSTR: 32037.14.aps.74.20250258

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250258>

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

高性能PIN-硅探测器的研制及其在高能放射性核束实验中的应用测试

Development of high performance PIN-silicon detector and its application in radioactive beam physical experiment

物理学报. 2023, 72(12): 122902 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230213>

微波谐振腔低气压放电等离子体反应动力学过程

Reaction dynamic process of low pressure discharge plasma in microwave resonant cavity

物理学报. 2022, 71(24): 240702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221385>

基于多激光束驱动准单能高能质子束模拟研究

Simulation study of quasi-monoenergetic high-energy proton beam based on multiple laser beams driving

物理学报. 2023, 72(18): 184102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230313>

立方大腔体静高压装置中叶腊石的传压及密封性能研究

Research on pressure transmission and sealing performance of pyrophyllite in a cubic large chamber static high-pressure device

物理学报. 2024, 73(1): 019101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231087>

采用薄靶方法测量低能电子致Al, Ti, Cu, Ag, Au元素K壳层电离截面与L壳层特征X射线产生截面

Measurements of K-shell ionization cross sections and L-shell X-ray production cross sections of Al, Ti, Cu, Ag, and Au thin films by low-energy electron impact

物理学报. 2022, 71(17): 173402 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220162>

低气压感性耦合等离子体源模拟研究进展

Numerical investigation of low pressure inductively coupled plasma sources: A review

物理学报. 2021, 70(9): 095206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202247>