

# 一种用于强流脉冲离子束的束流输出 稳定性实时监测方法\*

许莫非<sup>1)2)3)</sup> 于翔<sup>1)2)3)</sup> 张世健<sup>1)2)3)</sup>Gennady Efimovich Remnev<sup>1)4)</sup> 乐小云<sup>1)2)3)†</sup>

1) (北京航空航天大学物理学院, 北京 100191)

2) (北京航空航天大学, 大数据精准医疗高精尖创新中心, 北京 100191)

3) (北京航空航天大学, 先进核能与物理北京市重点实验室, 北京 100191)

4) (托木斯克理工大学, 托木斯克 634050)

(2023年5月25日收到; 2023年6月4日收到修改稿)

强流脉冲离子束辐照后的材料表面状态对束流强度具有极高的敏感性. 因此, 在辐照实验中监测束流输出的稳定性, 并及时识别出参数抖动较大的脉冲, 对于实验结果的分析 and 表面改性效果的优化具有重要意义. 本文利用塑料闪烁体构建了一种时间分辨为 6 ns 的快响应脉冲 X 射线诊断系统, 成功捕获了外磁绝缘离子束二极管工作时产生的 X 射线. 同时, 通过红外相机和法拉第筒对离子束流的能量密度和电流密度进行测量. 分析结果显示, 韧致辐射强度和离子束发射强度均取决于二极管加速电压, 导致 X 射线强度和离子束流能量密度呈现正相关趋势. 当离子电流密度发生抖动时, X 射线信号幅值表现出良好的变化跟随性, 能够对偏离预设参数区间的脉冲做出响应. 这说明本文提出的非拦截式诊断方法能够有效地实时监测强流脉冲离子束束流输出的稳定性.

**关键词:** 强流脉冲离子束, 束流输出稳定性, 实时监测, 脉冲 X 射线诊断系统

**PACS:** 52.59.-f, 41.85.Qg

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230854

## 1 引言

强流脉冲离子束 (intense pulsed ion beam, IPIB) 技术的起源可以追溯到 20 世纪 60 年代对惯性约束核聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 点火技术的研究<sup>[1-3]</sup>. 许多研究中也将在 IPIB 用于准单能  $\gamma$  射线的产生以及模拟材料的软 X 射线热-力学效应<sup>[4-6]</sup>. 尽管早期的 IPIB 技术主要聚焦军工行业, 但随着时代的发展, 近年来, IPIB 的应用逐渐扩展到民用领域, 尤其是在材料

表面工程领域取得了显著的成就.

应用于材料科学的 IPIB 不再追求极高的离子能量和束流强度, 其典型参数如下<sup>[7,8]</sup>: 离子能量 100—500 keV, 离子电流密度几十至几百 A/cm<sup>2</sup>, 脉冲宽度几十至几百 ns. 此特征参数的 IPIB 可以在短时间内将几至几十 J/cm<sup>2</sup> 的能量沉积在材料浅表层 (深度为  $\mu\text{m}$  量级), 产生极高的体功率密度, 可使材料表层在几百至几千 ns 内升温至数千摄氏度并迅速冷却至室温, 加热和冷却的速率高达 10<sup>9</sup>—10<sup>10</sup> K/s<sup>[9,10]</sup>. 基于以上特点, IPIB 技术在表面改性<sup>[11-13]</sup>、表面混熔<sup>[14,15]</sup>、表面抛光<sup>[16,17]</sup>、薄膜沉

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12075024) 和国防基础科研项目 (批准号: 12700002022119001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xyle@buaa.edu.cn

积<sup>[18,19]</sup>、纳米粉末合成<sup>[20]</sup>等领域得到广泛应用。

在利用 IPIB 进行材料表面辐照的过程中, 由于气体开关存在击穿抖动和阳极表面状态变化等因素的影响, 不同脉冲之间输出的束流强度有时会出现一定程度的波动. 此外, 材料在 IPIB 辐照后的表面状态对于束流强度非常敏感<sup>[21–25]</sup>, 偏离设定参数范围的束流辐照会影响表面形貌和缺陷密度. 如果某个脉冲的 IPIB 束流强度明显偏离预期, 这将对表面改性的整体效果产生影响, 特别是在低脉冲个数的辐照条件下, 这种影响更加显著. 因此, 在材料辐照过程中实现对 IPIB 束流强度的在线监测, 及时甄别异常强度的脉冲, 对于有效分析评估实验结果、优化改进辐照参数以及提升表面改性效果具有十分重要的意义.

目前存在几种较为成熟的 IPIB 束流诊断方法, 包括法拉第筒用于测量离子电流密度<sup>[26]</sup>、量热器或红外相机用于测量束流能通量<sup>[27,28]</sup>等. 这些方法可以直接用于诊断 IPIB 的束流强度, 但都属于束流截断式测量方法, 无法与 IPIB 材料辐照实验同步进行. 近年来, 还发展出了一些间接诊断 IPIB 束流强度的方法, 如核反应法和应力波测量法, 为在线监测 IPIB 的束流稳定性提供了可能, 但 these 方法也存在使用场景限制. 核反应法即利用 IPIB 轰击特定靶材 (如 BN, B<sub>4</sub>C) 诱发核反应, 通过测量瞬发  $\gamma$  射线或反应产物衰变时放出的  $\gamma$  射线来间接推定 IPIB 的束流参数<sup>[29,30]</sup>. 然而, 该方法要求入射离子的能量达到诱发核反应的临界值, 并且对靶材成分有严格要求, 无法满足靶材多样化和低能 IPIB 诊断的实际需求. 另一种方法是利用压电转换器测量 IPIB 辐照靶材引发的应力波来间接监测 IPIB 束流强度的抖动<sup>[31,32]</sup>. 然而, 该方法要求靶材与压电转换器之间实现良好的耦合, 且对于刚度较小的靶材适用性还不确定.

因此, 为了发展高效且应用广泛的 IPIB 束流稳定性在线监测系统, 必须采用非拦截式的测量方式, 且摆脱对靶材的依赖性. 一种切实可行的方案是获取和分析 IPIB 形成或输运过程中产生的并发辐射信息, 例如离子束二极管工作过程中产生的韧致辐射或等离子体光谱. 之前的实验研究中, Masugata 等<sup>[33]</sup>和杨海亮等<sup>[34]</sup>在实验中曾发现磁绝缘离子束二极管中阴极出射的电子轰击阳极及其周边结构会导致脉冲韧致辐射的产生. 然而, 迄今为止, 对于该并发产生的脉冲韧致辐射的深入分析

研究还相对较少.

本文设计了一种基于 EJ-200 塑料闪烁体的快速响应脉冲 X 射线探测系统, 用于捕获外磁绝缘离子束二极管发射 IPIB 时产生的脉冲韧致辐射信号. 通过将该捕获的信号与 IPIB 束流能量密度和电流密度进行对比分析, 发现脉冲 X 射线信号的强度与 IPIB 束流强度之间存在显著的正相关性和变化一致性. 这一结果表明, 外磁绝缘离子束二极管产生的 X 射线可以有效用于在线监测 IPIB 束流输出的稳定性.

## 2 诊断系统与方法

本次实验在北京航空航天大学高能量密度物理实验室的强流脉冲离子束加速器 (BIPPAB-450) 上进行. 该装置的前端是磁脉冲发生器, 能够产生高达 250 kV 的高压脉冲. Blumlein 脉冲成形线的介质是去离子水, 可以将高压脉冲整形并压缩至 80 ns (FWHM). 经过压缩的脉冲经过自耦变压器升压至 450 kV, 然后加载到磁绝缘离子束二极管上. 该二极管的内、外阴极结构中各嵌有一个同轴线圈, 在线圈上施加脉冲电流可以在阴-阳极间隙产生横向磁场, 用于限制阴极出射电子的运动, 以提高离子束的产生效率. 由于磁场线圈通电后在真空环境中存在散热过程, 因此 BIPPAB-450 在离子束发射模式下的工作频率不超过 1/60, 即每分钟发射一次脉冲. 该装置工作原理的详细描述见文献<sup>[35]</sup>. 用于获取脉冲 X 射线信号的探测系统和方法如图 1 所示. 由于 BIPPAB-450 产生的 IPIB 具有短脉冲宽度, 半高宽仅为 80 ns, 因此在本实验中选择了具有快时间响应的 EJ-200 塑料闪烁体作为射线探测晶体, 其尺寸为 13 cm×3.5 cm×0.5 cm. 此外, 塑料闪烁体具有耐辐照特性, 可以确保探测系统在强辐射环境下的稳定性. 塑料闪烁体后端耦合了 9266FLB 光电倍增管, 用于实现光电信号转换与放大. 光电倍增管输出的信号通过同轴电缆传输到 Tektronic TDS 2024 四通道示波器进行记录. 探测器位于真空靶室的侧面, 距离离子束二极管中心位置直线距离 1 m. 为了验证韧致辐射信号与 IPIB 束流强度之间的关联性, 还同步采用红外成像方法对 IPIB 的束流能量密度进行诊断. 热沉靶材选用 304 不锈钢, 放置在距二极管阴极出口 15 cm 处的束斑焦点位置, 其尺寸为 10 cm×10 cm,

厚度为 100  $\mu\text{m}$ . 红外相机的型号为 Fluke Ti25, 采用远程控制机械臂触发的方式, 以降低 IPIB 参数获取的时间延迟. 有关红外诊断方法的详细介绍可参考文献 [36].

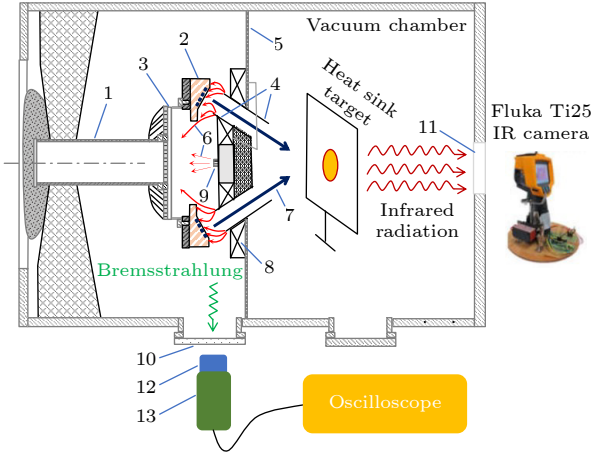


图 1 诊断方法示意图. 1-高压端柱; 2-阳极; 3-阳极托盘; 4-阴极; 5-阴极支撑盘; 6-电子; 7-离子束; 8-绝缘磁场线圈; 9-磁场线圈固定器; 10-有机玻璃观察窗; 11-CaF<sub>2</sub> 窗口; 12-EJ-200 塑料闪烁体; 13-9266 FLB 光电倍增管

Fig. 1. Diagnostic method diagram. 1- High voltage input; 2-anode; 3- anode tray; 4-cathode; 5-cathode support plate; 6- electron; 7-ion beam; 8-insulated magnetic field coils; 9- magnetic field coils fixer; 10- organic glass observation window; 11-CaF<sub>2</sub> window; 12-EJ-200 plastic scintillator; 13- 9266 FLB photomultiplier tube.

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 诊断系统的响应时间

为了准确获得脉冲 X 射线的特性, 诊断系统的响应时间需满足一定要求, 以避免脉冲辐射信号由于波形展宽而出现失真. 通常要求诊断系统的时间响应半高宽不超过被测辐射脉冲半高宽的 1/3 [37]. 本研究采用单粒子法 (宇宙线粒子) [38] 对系统的时间响应特性进行测量, 结果如图 2 所示. 所搭建的诊断系统响应时间半高宽为 6 ns, 远小于 BIPPAB-450 输出脉冲的 80 ns 半高宽, 因此能够满足测试要求.

#### 3.2 脉冲 X 射线强度与 IPIB 束流强度的关联性

为验证脉冲 X 射线与 IPIB 束流之间的关联性, 选择 10 个不同的 IPIB 束流能量密度, 并将与测得的 X 射线信号强度进行比对. 束流强度的调节是通过改变离子束二极管的绝缘磁场强度实现

的. 绝缘磁场决定了二极管阻抗, 进而影响二极管的工作电压. 在 BIPPAB-450 装置中, 当绝缘磁场的强度小于 1.18 T 时, 随着绝缘磁场的增大, 二极管的工作电压增大, 从而导致输出的 IPIB 束流强度增大 [39]. 为避免靶材烧蚀对束流能量密度的诊断误差, 将束流的最高能量密度控制在 1.32 J/cm<sup>2</sup> 以下. 在 IPIB 辐照前后, 从热沉靶的背面捕获了红外图像, 具体见图 3(a) 和图 3(b). 同时, 诊断系统同步捕获了脉冲 X 射线信号, 如图 3(c) 所示.

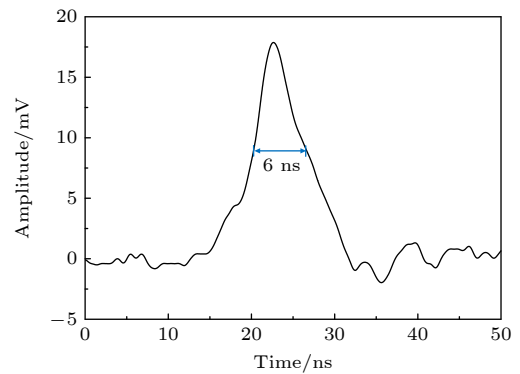


图 2 诊断系统的时间响应测试结果

Fig. 2. Time response test of the diagnostic system.

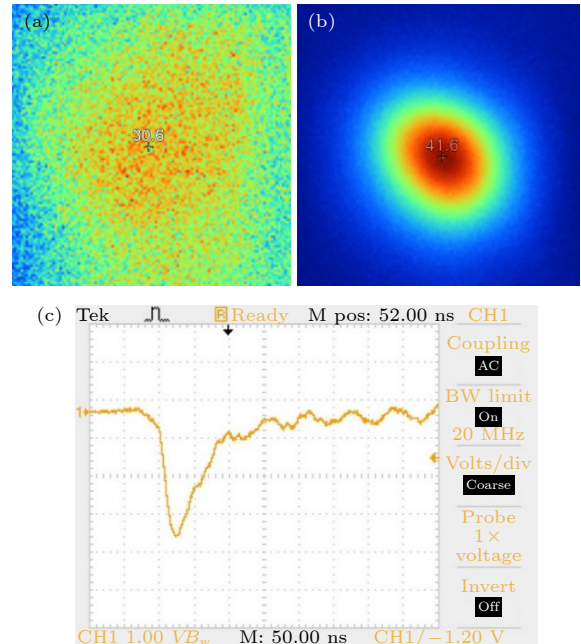


图 3 红外相机在 (a) IPIB 辐照前、(b) IPIB 辐照后从热沉靶背面捕获的红外图像, 以及 (c) 诊断系统捕获的脉冲 X 射线信号波形

Fig. 3. The infrared image captured by the infrared camera from the backside of the heat sink target before (a) IPIB irradiation, (b) after IPIB irradiation, and (c) the pulse X-ray signal waveform captured by the diagnostic system.

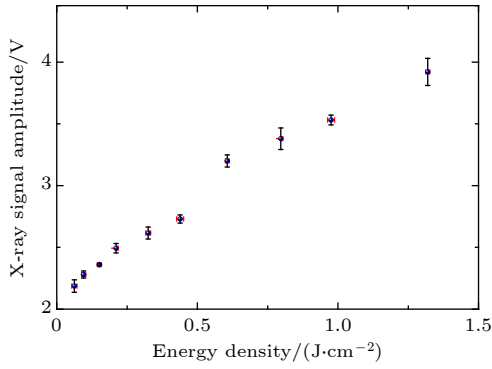


图 4 脉冲 X 射线信号幅值与 IPIB 束流能量密度之间的关系

Fig. 4. Relationship between the amplitude of pulse X-ray signal and the energy density of IPIB.

图 4 统计了不同 IPIB 束流能量密度下的 X 射线信号幅值, 可以观察到二者存在明显的正相关性. 根据理论分析, 这种现象是合理的, 因为脉冲 X 射线信号强度和 IPIB 束流强度都与二极管的工作电压 (电子和离子的加速电压) 密切相关. 实验中捕获的脉冲 X 射线的主要来自阴极出射电子轰击阳极及阳极周围结构所产生的轫致辐射, 图 5(a) 展示了该过程的示意图. 而图 5(b) 显示了除环状阳极区域外, 阳极托盘中心处也存在明显的电子辐照痕迹. 根据 Fowler-Nordheim 公式, 阴极场致发射电子的强度  $J_e$  与电压  $U$  之间存在以下关系式:

$$J_e = A\beta^2 U^2 \exp\left(\frac{-B}{\beta U}\right), \quad (1)$$

其中,  $A$  和  $B$  是与发射体相关的功函数,  $\beta$  为场强变换几何因子. 从 (1) 式可以看出, 加速电压的增大会导致阴极场致发射电子数量的增加. 此外, 单个电子的轫致辐射能量损失率<sup>[40]</sup>可表示为

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} \propto U \frac{e^3 Z^2}{m_e^2} N, \quad (2)$$

其中,  $m_e$  和  $e$  分别为电子质量和电子电荷,  $Z$  和  $N$  分别为吸收物质的原子序数和原子密度. 因此, 阴极发射的电子与阳极相互作用产生的总体轫致辐射强度可表示为

$$E_{\text{rad}} = J_e \cdot U e \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} \propto J_e U^2 \frac{e^4 Z^2}{m_e^2} N. \quad (3)$$

不难观察到, 轫致辐射强度  $E_{\text{rad}}$  与二极管加速电压  $U$  呈正相关.

同时, 根据 Child-Langmuir 定律, 离子束流强度  $J_i$  与电压  $U^{3/2}$  成正比:

$$J_i = \frac{4K\varepsilon_0}{9} \left(\frac{2Z_i}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2}, \quad (4)$$

其中,  $K$  为二极管的几何聚焦产生的常数,  $\varepsilon_0$  是真空介电常数,  $m_i$  和  $Z_i$  分别是离子质量和离子电荷数,  $d$  为阴阳极间距. 结合 (1), (3), (4) 式, 可得到以下关系:

$$E_{\text{rad}} \propto J_i^{\frac{8}{3}} \exp\left(-\frac{B}{\beta} J_i^{-\frac{2}{3}}\right), \quad (5)$$

(5) 式证明了轫致辐射强度  $E_{\text{rad}}$  与离子束流强度  $J_i$  之间存在正相关性. 因此, 脉冲 X 射线信号的幅值可以与 IPIB 束流强度同步地变化. 这为利用 X 射线信号实时监测 IPIB 束流输出的稳定性提供了可能性.

### 3.3 系统的在线测试

为进一步验证 IPIB 束流在线监测方法的可靠性, 使用法拉第筒替代了红外成像方法, 用于测量 IPIB 的离子电流密度. 法拉第筒放置在距二极管

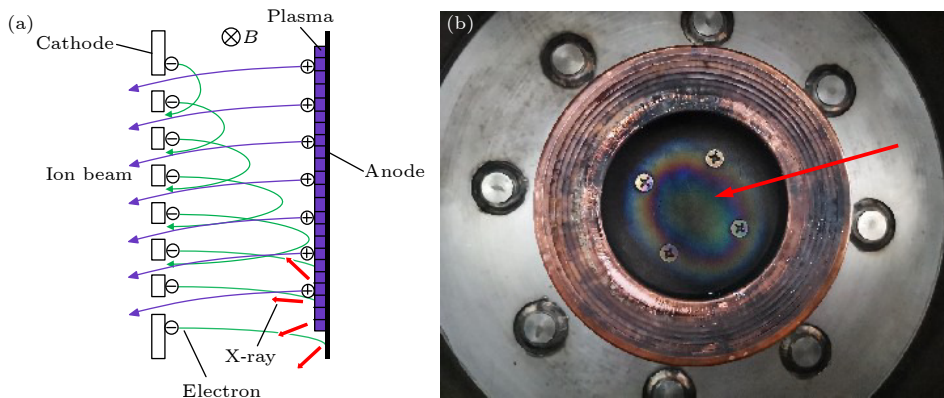


图 5 (a) 轫致辐射产生示意图; (b) 阳极结构实物图

Fig. 5. (a) Schematic diagram of bremsstrahlung generation; (b) picture of anode structure.

阴极出口 15 cm 处的束斑焦点位置, 如图 6 所示. 同时利用诊断系统和高压分压器分别测量脉冲 X 射线信号和二极电压信号, 并将 3 个信号输入 Tektronic TDS 2024 四通道示波器进行波形采集. 实验测量得到的波形图如图 7 所示. 离子束二极管与探测晶体的距离为 1 m, X 射线从源点直射入探测器所需要的时间约 3 ns. 9266FLB 光电倍增管的渡越时间为 40 ns. 脉冲 X 射线信号通道的同轴电缆长度比其他通道长 2.5 m, 信号在同轴电缆中传输的速度约为光速的 80%, 因此脉冲 X 射线信号晚于其他通道信号约 10 ns 进入示波器. 多因素综合作用导致脉冲 X 射线信号滞后于二极管电压信号约 55 ns. 此外, 由于 X 射线在空间传输过程中存在散射, 散射光子的在进入探测晶体前运动路径相对于直射光子更长, 导致了 X 射线信号的波形出现拖尾现象.

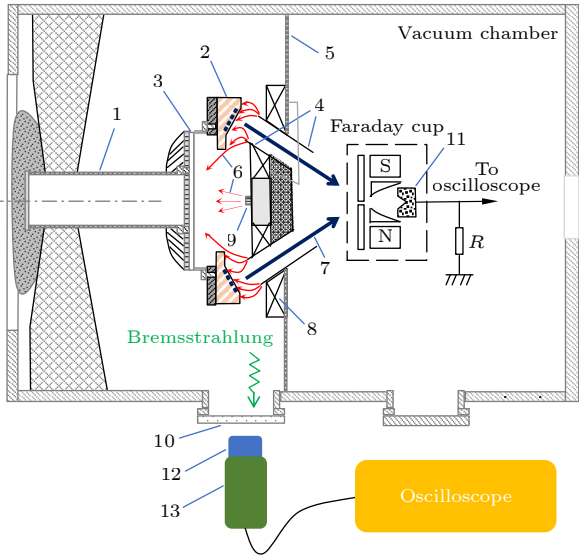


图 6 实验装置示意图. 1-高压端柱; 2-阳极; 3-阳极托盘; 4-阴极; 5-阴极支撑盘; 6-电子; 7-离子束; 8-绝缘磁场线圈; 9-磁场线圈固定器; 10-有机玻璃观察窗; 11-石墨收集体; 12-EJ-200 塑料闪烁体; 13-9266 FLB 光电倍增管

Fig. 6. Schematic diagram of experimental equipment. 1-High voltage input; 2-anode; 3-anode tray; 4-cathode; 5-cathode support plate; 6-electron; 7-ion beam; 8-insulated magnetic field coils; 9-magnetic field coils fixer; 10-organic glass observation window; 11-graphite collector; 12-EJ-200 plastic scintillator; 13-9266 FLB photomultiplier tube.

为了测试不同强度的 IPIB 在发生输出抖动时, 诊断系统能否实现同步响应, 选择 3 种不同的束流水平, 分别为 30, 60, 110 A/cm<sup>2</sup>. 根据图 8 的结果可以看出, 当 IPIB 的束流强度明显变化时, 脉冲 X 射线诊断系统输出的信号强度也会同步改

变. 在低束流强度区间, X 射线信号显示出良好的同步跟随性. 在高束流强度区间, 当出现较大的强度抖动 (超过 10%), X 射线信号能够灵敏地同步响应. 结果表明该诊断系统能够帮助实验人员实现对 IPIB 束流输出稳定性的在线监测, 及时识别出发生明显输出抖动的脉冲.

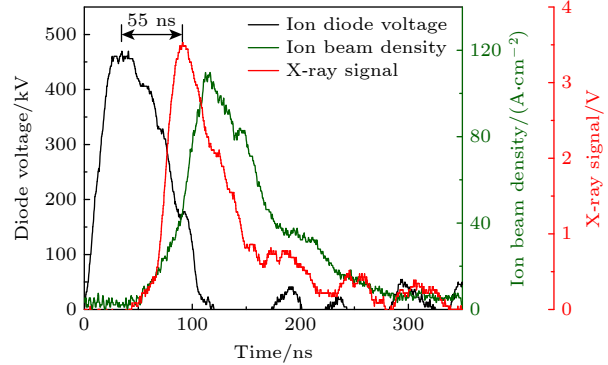


图 7 二极管电压、离子电流密度和 X 射线信号波形图

Fig. 7. Diode voltage, ion current density, and X-ray signal waveform.

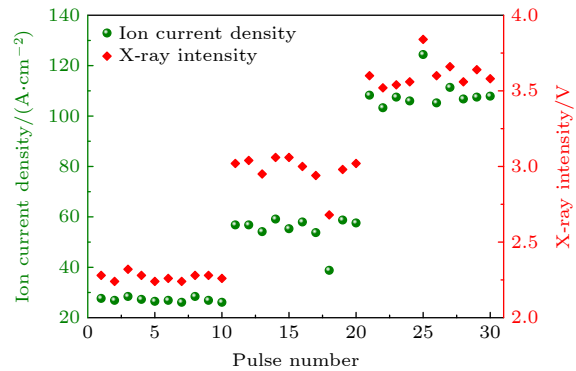


图 8 X 射线信号幅值与离子电流密度的对应关系

Fig. 8. Correspondence between X-ray signal amplitude and ion current density.

## 4 结 论

本文针对辐照实验中需要实时监测 IPIB 束流输出稳定性的需求, 设计了一种基于塑料闪烁体的脉冲 X 射线诊断系统, 并利用 X 射线信号特征实现了 IPIB 束流稳定性的在线监测. 单粒子测试显示该系统的响应时间仅为 6 ns, 能够对脉冲半高宽为 80 ns 的韧致辐射场进行探测. 同时, 采用红外成像法对 IPIB 束流能量密度进行测量, 发现 X 射线信号强度随束流能量密度增大而增大. 利用离子束流强度和韧致辐射强度对二极管加速电压的依

赖关系进行定性解释, 阐明了这种趋势的产生原因. 通过使用法拉第筒进一步验证了脉冲 X 射线强度与 IPIB 束流强度变化的同步性, 发现当 IPIB 的束流强度发生较大偏离 (超过预定值的 10%) 时, X 射线信号的幅值表现出良好的跟随性. 研究结果表明, 本文提出的方法能够有效地识别出跳离预定参数范围的脉冲, 为在线诊断 IPIB 束流输出的稳定性提供了一种非拦截式的监测方法.

## 参考文献

- [1] Humphries S 1980 *Nucl. Fusion* **20** 1549
- [2] Van Devender J P 1986 *Plasma Phys. Control. Fusion* **28** 841
- [3] Long K A, Tahir N A 1982 *Phys. Lett. A* **91** 451
- [4] Yang H L, Qiu A C, Zhang J S, He X P, Sun J F, Peng J C, Tang J P, Ren S Q, Ouyang X P, Zhang G G, Huang J J, Yang L, Wang H Y, Li H Y, Li J Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 406 (in Chinese) [杨海亮, 邱爱慈, 张嘉生, 何小平, 孙剑锋, 彭建昌, 汤俊萍, 任书庆, 欧阳晓平, 张国光, 黄建军, 杨莉, 王海洋, 李洪玉, 李静雅 2004 物理学报 **53** 406]
- [5] Mach H, Rogers D W O 1983 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 1514
- [6] Baumung K, Bluhm H J, Goel B, Hoppé P, Karow H U, Rusch D, Fortov V E, Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V, Vorobjev O Y 1996 *Laser Part. Beams* **14** 181
- [7] Zhong H W, Zhang J, Shen J, Liang G Y, Zhang S J, Huang W Y, Xu M F, Yu X, Yan S, Efimovich Remnev G, Le X Y 2019 *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **461** 226
- [8] Yu X, Zhang S J, Stepanov A V, Shamanin V I, Zhong H W, Liang G Y, Xu M F, Zhang N, Kuang S, Ren J, Shang X, Yan S, Remnev G E, Le X Y 2020 *Surf. Coatings Technol.* **384** 125351
- [9] Zhang S J, Yu X, Zhong H W, Liang G Y, Xu M F, Zhang N, Ren J H, Kuang S C, Yan S, Gennady E R, Le X Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 115202 (in Chinese) [张世健, 喻晓, 钟昊玟, 梁国营, 许莫非, 张楠, 任建慧, 匡仕成, 颜莎, Gennady Efimovich Remnev, 乐小云 2020 物理学报 **69** 115202]
- [10] Le X Y, Zhao W J, Yan S, Han B X, Xiang W 2002 *Surf. Coatings Technol.* **158–159** 14
- [11] Zhang F G, Zhu X P, Wang M Y, Lei M K 2011 *Acta Metall. Sin.* **47** 958 (in Chinese) [张锋刚, 朱小鹏, 王明阳, 雷明凯 2011 金属学报 **47** 958]
- [12] Zhang S J, Yu X, Zhang J, Shen J, Zhong H W, Liang G Y, Xu M, Zhang N, Ren J, Kuang S, Shang X, Adegboyega O, Yan S, Remnev G E, Le X Y 2021 *Vacuum* **187** 110154
- [13] Zhao W J, Remnev G E, Yan S, Opekounov M S, Le X Y, Matvienko V M, Han B X, Xue J M, Wang Y G 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 1045
- [14] Yan S, Le X Y, Zhao W J, Shang Y J, Wang Y, Xue J 2007 *Surf. Coatings Technol.* **201** 4817
- [15] Xu M F, Yu X, Zhang S J, Yan S, Tarbokov V, Remnev G, Le X Y 2023 *Materials (Basel)* **16** 3028
- [16] Yu X, Shen J, Zhong H W, Zhang J, Yan S, Zhang G L, Zhang X, Le X Y 2015 *Vacuum* **120** 116
- [17] Hashimoto Y, Yatsuzuka M 2000 *Vacuum* **59** 313
- [18] Prasad S V, Renk T J, Kotula P G, DebRoy T 2011 *Mater. Lett.* **65** 4
- [19] Suzuki T, Saikusa T, Suematu H, Jiang W, Yatsui K 2003 *Surf. Coatings Technol.* **169–170** 491
- [20] Zhu Q, Jiang W, Yatsui K 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 5279
- [21] Shulov V A, Novikov A S, Paikin A G, Belov A B, Lvov A F, Remnev G E 2007 *Surf. Coatings Technol.* **201** 8654
- [22] Zhang J, Zhong H W, Shen J, Yu X, Yan S, Le X Y 2020 *Surf. Coatings Technol.* **388** 125599
- [23] Kovivchak V S, Panova T V, Mikhailov K A, Knyazev E V 2013 *J. Surf. Investig.* **7** 531
- [24] Zhang Q, Mei X X, Guan T, Zhang X N, Remnev G E, Pavlov S K, Wang Y N 2019 *Fusion Eng. Des.* **138** 16
- [25] Mei X X, Zhang X N, Liu X, Wang Y N 2017 *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **406** 697
- [26] Gerdin G, Stygar W, Venneri F 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 3269
- [27] Christodoulides C E, Freeman J H 1976 *Nucl. Instruments Methods* **135** 13
- [28] Davis H A, Bartsch R R, Olson J C, Rej D J, Waganaar W J 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 3223
- [29] Ryzhkov V A, Stepanov A V, Pyatkov I N, Remnev G E 2021 *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* **1013** 165671
- [30] Ryzhkov V A, Pyatkov I N, Remnev G E 2021 *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* **998** 165190
- [31] Pushkarev A I, Isakova Y I, Yu X, Khailov I P 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84**
- [32] Dong Z H, Liu C, Han X G, Lei M K 2007 *Surf. Coatings Technol.* **201** 5054
- [33] Masugata K, Chishiro E, Yatsui K 1998 *Proceedings of the 12th International Conference on High-Power Particle Beams* Haifa, Israel, June 12, 1998 pp222–225
- [34] Yang H L, Qiu A C, Sun J F, He X P, Tang J P, Wang H Y, Li H Y, Li J Y, Ren S Q, Huang J J, Zhang J S, Peng J C, Ouyang X P, Zhang G G 2004 *Atom. Ener. Sci. Tech.* **38** 204 (in Chinese) [杨海亮, 邱爱慈, 孙剑锋, 何小平, 汤俊萍, 王海洋, 李洪玉, 李静雅, 任书庆, 黄建军, 张嘉生, 彭建昌, 欧阳晓平, 张国光 2004 原子能科学技术 **38** 204]
- [35] Yu X, Shen J, Isakova Y I, Zhong H W, Zhang J, Yan S, Zhang G L, Zhang X F, Le X Y 2015 *Vacuum* **122** 12
- [36] Qu M, Yu X, Zhang J, Shen J, Zhong H W, Zhang Y Y, Yan S, Zhang X F, Zhang G L, Le X Y 2015 *High Power Laser and Particle Beams* **27** 7 (in Chinese) [屈苗, 喻晓, 张洁, 沈杰, 钟昊玟, 张艳燕, 颜莎, 张小富, 张高龙, 乐小云 2015 强激光与粒子束 **27** 216]
- [37] Liu Q Z 1994 *Pulse Radiation Field Diagnosis Technology* (Beijing: Science Press) p98 (in Chinese) [刘庆兆 1994 脉冲辐射场诊断技术 (北京: 科学出版社) 第 98 页]
- [38] Zheng Z P, Zhu Y C, Shao Y Y, Sun H S 1986 *Nucl. Elec. and Det. Tech.* **6** 112 (in Chinese) [郑志鹏, 祝玉灿, 邵毓莺, 孙汉生 1986 核电子学与探测技术 **6** 112]
- [39] Xu M F, Kuang S, Yu X, Zhang S J, Yan S, Remnev G E, Le X 2023 *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **537** 38
- [40] Chen B X, Zhang Z 2011 *Nuclear Radiation Physics and Detection* (Harbin: Harbin Engineering University Press) p146 (in Chinese) [陈伯显, 张智 2011 核辐射物理及探测学 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第 146 页]

# A method of real-time monitoring beam output stability of intense pulsed ion beam\*

Xu Mo-Fei<sup>1)2)3)</sup> Yu Xiang<sup>1)2)3)</sup> Zhang Shi-Jian<sup>1)2)3)</sup>

Gennady Efimovich Remnev<sup>1)4)</sup> Le Xiao-Yun<sup>1)2)3)†</sup>

1) (*School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

2) (*Beijing Advanced Innovation Center for Big Data-based Precision Medicine, Beihang University, Beijing 100191, China*)

3) (*Beijing Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy Materials and Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

4) (*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050, Russia*)

( Received 25 May 2023; revised manuscript received 4 June 2023 )

## Abstract

Intense pulsed ion beam (IPIB) technology has made remarkable progress in surface modification, mixing, polishing, film deposition, and nano powder synthesis in recent years. However, the surface properties of materials under IPIB irradiation are highly sensitive to beam intensity variations. Deviations from acceptable parameter range can change the surface characteristics and increase prevalence of defects. Consequently, the real-time online monitoring of beam stability during irradiation experiments and promptly identifying of pulses exhibiting significant parameter jitter are of significance in accurately analyzing results and optimizing surface modification. This study presents a fast-response pulse X-ray diagnostic system by employing EJ-200 plastic scintillator, 9266FLB photomultiplier tube, and Tektronic TDS 2024 four-channel oscilloscope. Single particle test demonstrates that the system achieves a time resolution of 6 ns, meeting the requirements for temporal response to detecting pulse X-ray signals with a half-width of ~80 ns. By adjusting the insulation magnetic field strength of the ion diode, the IPIB output level is regulated. The diagnostic system successfully captures X-rays emitted by the external magnetic insulated ion diode operating at different output levels. Simultaneously, the ion beam energy density is measured by using an infrared camera. To mitigate diagnostic errors stemming from target ablation, the maximum energy density is controlled to be below 1.32 J/cm<sup>2</sup>. Analysis results establish a positive correlation between X-ray intensity and ion beam energy density. This relationship arises from the influence of the insulating magnetic field adjustment on the diode's operating voltage, which subsequently affects the bremsstrahlung radiant intensity and ion beam emission intensity. This correlation offers the potential for the real-time monitoring of IPIB beam output stability by utilizing X-ray signals. To further corroborate the synchronized changes in pulse X-ray intensity and ion beam intensity, Faraday cup is employed as an alternative to infrared imaging method for measuring ion current density. Results demonstrate that the amplitude of the X-ray signal changes synchronously with fluctuations of ion current density. It is worth noting that when the output intensity of ion beam deviates significantly (more than 10% of the preset value), the diagnostic system will respond quickly. These findings validate the efficacy of the proposed non-interceptive diagnostic method of real-time monitoring the intense pulsed ion beam output stability.

**Keywords:** intense pulsed ion beam, beam output stability, real-time monitoring, pulsed X-ray diagnostic system

**PACS:** 52.59.-f, 41.85.Qg

**DOI:** [10.7498/aps.72.20230854](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230854)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12075024) and the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. 12700002022119001).

† Corresponding author. E-mail: [xyle@buaa.edu.cn](mailto:xyle@buaa.edu.cn)



一种用于强流脉冲离子束的束流输出稳定性实时监测方法

许莫非 于翔 张世健 Gennady Efimovich Remnev 乐小云

**A method of real-time monitoring beam output stability of intense pulsed ion beam**

Xu Mo-Fei Yu Xiang Zhang Shi-Jian Gennady Efimovich Remnev Le Xiao-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 175205 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230854

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230854>

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

烧蚀对强脉冲离子束在聚合物材料中能量沉积的影响

Influence of ablation on energy deposition in polymer material under irradiation of intense pulsed ion beam

物理学报. 2020, 69(11): 115202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200212>

用于超声分子束束流特性测试的纹影系统研制及应用

Development and applications of schlieren system for measuring characteristics of supersonic molecular beam

物理学报. 2020, 69(21): 215202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201383>

基于换能器驱动信号特征的高强度聚焦超声焦域损伤实时监测

Real-time monitoring of high intensity focused ultrasound focal damage based on transducer driving signal

物理学报. 2022, 71(3): 037201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211443>

稳定的高亮度低速亚稳态氦原子束流

A bright and stable beam of slow metastable helium atoms

物理学报. 2021, 70(13): 133201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201833>

基于稳定性SPH-SWE数值模型的真实感流体动画实时模拟

Real-time simulation of realistic fluid animation based on stable SPH-SWE numerical model

物理学报. 2021, 70(23): 234701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211251>

一种200 kV的多功能脉冲辐射系统研制

Development of 200 kV multi-function pulsed radiation system

物理学报. 2021, 70(20): 205206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210583>