

脉冲硬 X 射线能注量测量技术*

苏兆锋[†] 来定国 邱孟通 徐启福 任书庆

(西北核技术研究院, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2019 年 11 月 7 日收到; 2020 年 3 月 9 日收到修改稿)

阐述了全吸收法测量脉冲硬 X 射线能注量的基本原理, 选择了光电管配合硅酸镓 (LSO) 闪烁体作为探测系统的核心部件, 研制了脉冲硬 X 射线能注量测量系统. 利用该系统测量了“闪光二号”加速器产生的脉冲硬 X 射线强度, 结合灵敏度的实验标定结果, 计算得到了脉冲硬 X 射线的能注量. 在连续 5 发次的实验中, 能注量平均测量结果为 35.9 mJ/cm², 根据实测剂量和能谱计算得到的能注量为 39.8 mJ/cm², 两者的结果比较一致.

关键词: 脉冲硬 X 射线, 能注量, 闪烁探测器, 硅酸镓闪烁体**PACS:** 52.59.Px, 52.70.La, 29.40.Mc**DOI:** 10.7498/aps.69.20191700

1 引言

近年来, 随着脉冲功率技术的发展, 硬 X 射线的应用越来越广泛^[1-3], 国内外的硬 X 射线源^[4-9]也越来越多. 以“闪光二号”加速器为平台的脉冲高能注量硬 X 射线源^[10]平均能量约为 80 keV, 宽度约为 55 ns, 能注量大于 20 mJ/cm², 辐照面积 50000 mm², 可用于开展单元级系统电磁脉冲 (SGEMP) 效应易损性和敏感性试验. 其中, 脉冲硬 X 射线的能注量是设备束流的主要参数, 需要准确测量. 由于硬 X 射线的穿透能力强^[11], 在物质中的射程长, 要实现其能注量的实验测量难度很大. 目前国际上多采用理论计算的方法获得: 依据射线的剂量和能谱^[12], 结合各个能段的质能吸收系数求得所有能段下的能注量.

目前, 国内外关于硬 X 射线能注量测量的实验研究尚处于起步阶段^[13,14], 很有必要发展一种适合脉冲硬 X 射线的能注量测量方法, 以丰富硬 X 射线辐射场参数诊断技术, 为设备考核提供实验

数据支持. 本文对该测量领域进行了原理分析和实验研究, 介绍了一种基于全吸收法的技术方案和系统设计思路, 通过对测量核心部件的选型、灵敏度标定, 研制了测量系统并获得了能注量的实验结果.

2 系统构成及基本原理

采用闪烁探测器配合高密度闪烁体的全吸收法进行测量. 测量系统由闪烁探测器、高密度闪烁体、中性减光片、射线准直系统、可见光屏蔽材料、电源及采集系统组成. 闪烁探测器使用的是由中国电子科技集团公司第五十五研究所研制的光电管. 减光片可实现闪烁体产生荧光的线性衰减^[15], 避免了波形饱和. 射线准直系统和可见光屏蔽材料有效限制了光源的来源, 增加了信噪比. 可见光屏蔽材料为厚度 0.1 mm 的黑卡纸, 屏蔽了室内自然光和照明光线, 对脉冲 X 射线的衰减可以忽略. 图 1 为测量系统组成示意图.

射线经过准直后照射到闪烁体上, 激发出荧光, 经过减光片后被光电管阴极吸收, 荧光通过光电效应产生光电子, 光电子在电场的作用下被阳极

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875214) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xcw9504@163.com

收集, 输出产生电脉冲信号^[16]. 由标准 X 射线源标定入射光子能量与探测器电流的转换系数, 结合实测波形的幅值和匹配电阻, 计算得到实际入射光子的能量, 再除以入射光子的接收面积, 即可以得到射线的能注量.

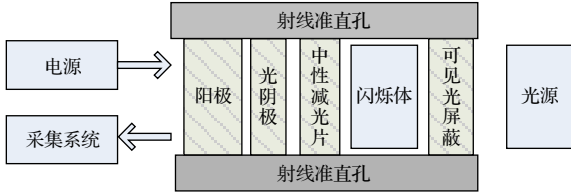


图 1 硬 X 射线能注量测量系统组成示意图

Fig. 1. The abridged general view of the fluence measurement system for pulse hard X-ray.

3 闪烁体选型

为了充分收集所有 X 射线, 实现光的全吸收^[17],

要求闪烁体要有足够高的密度和厚度, 而且必须具备机械上的坚固耐用性、正常气氛下的化学稳定性以及辐射条件下的性能稳定性 (即辐射硬度). 表 1 列出几种常见高密度闪烁体参数对比.

通过闪烁体各项参数的对比及理论分析, 结合待测射线源强度, 选定了硅酸镧 (LSO) 闪烁体^[18]. 它的主要特点是平均原子序数高、密度大, 对高能射线的阻止本领大, 适合用于高能辐射探测的场合^[19–21]. 测量系统所用光电管阴极直径为 18 mm, 为保证荧光全部被收集, 闪烁体直径略小于光阴极尺寸, 设计为 16 mm. 理论计算了加速器出射的 X 射线能谱, 表 2 为基于理论能谱分布的入射光子通过不同厚度 LSO 闪烁体的总透射率.

实验中闪烁体厚度设置为 20 mm, 由表 2 数据可知, 待测 X 射线透射率为 0.44%, 可视作为对射线完成了全吸收, 设计满足实验要求.

表 1 几种常见高密度闪烁体参数对比

Table 1. The parameter comparison of several common high density scintillators.

| 闪烁体 | 最强发射波长/nm | 闪烁衰减时间/ns | 折射率 | 密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 相对光输出/% |
|---------------------------------------|-----------|-----------|------|-----------------------------------|-----------|
| $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ | 480 | 300 | 2.15 | 7.13 | 12.0–14.0 |
| BSO | 480 | 2/30/100 | 2.06 | 6.80 | 2.0–5.0 |
| LSO:Ce | 420 | 40 | 1.82 | 7.40 | 75.0 |
| PbWO_4 | 480 | 10 | 2.16 | 8.20 | 0.5–1.0 |
| GSO:Ce | 450 | 31/65 | 1.90 | 6.71 | 20.0 |
| ZnWO_4 | 480 | 5000 | 2.20 | 7.87 | 26.0 |
| CdWO_4 | 540 | 5000 | 2.30 | 7.90 | 40.0 |
| CaWO_4 | 540 | 5000 | 2.30 | 7.90 | 40.0 |

表 2 入射光子透过不同厚度闪烁体的透射率

Table 2. The transmissivity of the photon transmitting scintillators of different thicknesses.

| Thicknesses of scintillators /mm | 0.01 | 10.00 | 15.00 | 20.00 | 25.00 | 30.00 | 35.00 |
|----------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Transmissivity/% | 97.8200 | 1.9970 | 0.8750 | 0.4440 | 0.2270 | 0.1200 | 0.0695 |

4 灵敏度标定

脉冲硬 X 射线为连续谱, 闪烁体的灵敏度直接影响测量结果的精度, 要对具有能谱分布的脉冲辐射场进行精密物理测量, 就必须刻画出探测系统对 X 射线的能谱响应. 灵敏度标定实验在 Xunique II 型 X 光荧光谱仪上进行的, 标定平台由准单能直流 X 射线产生装置、高压发生器、控制器、探测器、高压电源、小电流计及高纯锗探测器 (HPG) 组成. 图 2 为标定平台组成框图, 图 3 为标定现场

图. 光谱仪产生的电子经过打靶后产生韧致辐射连续谱, 光子照射特定金属材料, 激发产生特征准单能 X 射线, 准单能 X 射线的谱纯度用高纯锗进行测量, 通过调节管电流和光阑孔径来控制 X 射线输出强度, 特征 X 射线光路为图中虚线框内, 强度由电离室监测. 将光电管进行光线密封后放置于探测器屏蔽体中, 光电管的入射窗与光束垂直, 使之直接照射到入射窗和光阴极上.

待标定的灵敏度定义为不同照射量条件下的光阴极收集电荷量^[22]. 首先测量出光谱仪未出光子之前光电管的底电流 I_0 , 随后光谱仪产生光子

束流, 通过光子准直器直接照射在光电管上, 产生的输出电流为 I . 光谱仪改变电子的输出能量和滤片的材料, 调节出射光子的能量, 测量相应的输出信号.

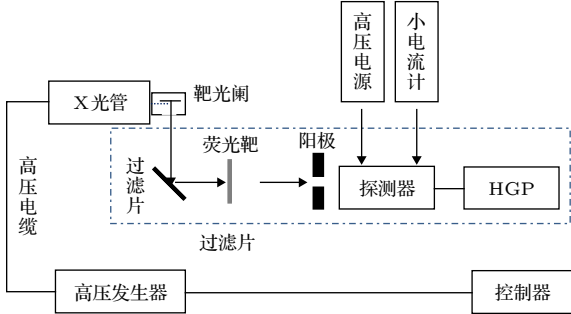


图 2 标定平台组成框图

Fig. 2. The block diagram of the calibration platform composition.

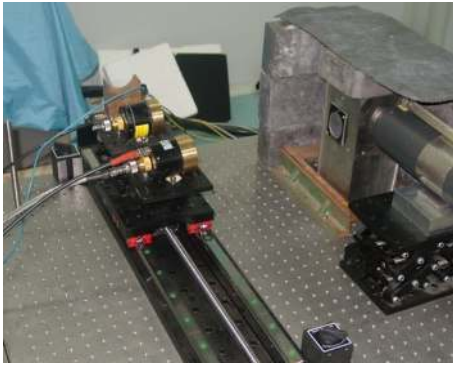


图 3 探测器灵敏度标定现场图

Fig. 3. The field diagram of detector sensitivity calibration.

光电管的灵敏度 S_n 表示为^[23]

$$S_n = (I - I_d) / \varphi, \quad (1)$$

其中灵敏度 S_n 的单位为 $C \cdot \text{cm}^2 / \text{MeV}$, I 为光谱仪出射光束时光电管的输出电流, I_d 为本底电流, 均由 Keithley 6517A 型小电流计测量获得, φ 为光电管所在位置的注量率, 单位为 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 对于单能 X 或者 γ 射线, 空气中某点的照射量率 \dot{X} 与该点处的注量率 φ 有如下关系:

$$\varphi = \dot{X} \cdot \frac{W_a}{(\mu_{\text{en}}/\rho) \cdot e}, \quad (2)$$

照射量率 \dot{X} 单位为 R/s ($1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$), 对于同种类、同能量的射线和同一种被照物质来说, 吸收剂量与照射量成正比, 1 R 的 X 射线在空气中的吸收剂量约为 0.838 rad , 剂量率由 T10022 型 PTWUNIDOS 标准剂量仪实时获取, 可换算成照射量率. W_a 为电子在干燥空气中每形成一对离子所消耗的平均能量, 其值为 33.85 eV . μ_{en}/ρ 为空气对射线的质能吸收系数, 对于具有能谱分布的 X 射线, 该系数是能量的函数, 单位为 cm^2/kg , 可查表获得. e 为元电荷, 其值为 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

实验进行了铅 (Pb)、钨 (W)、镝 (Dy) 和锡 (Sn) 4 个靶材条件下的准单能 X 射线探测器灵敏度标定. 表 3 为灵敏度标定结果. 高能注量 X 射线源的平均能量大约为 80 keV , 选用特征能量较为接近的 Pb 靶所对应的灵敏度作为光电管灵敏度的最可几值.

5 能注量测量实验

以“闪光二号”加速器的高能注量射线源为实验平台进行了硬 X 射线能注量测量实验研究. 为满足效应测试实验要求, 加速器采用了串级二极管结构, 中间电极阻挡主阴极发射的电子并转换为 X 射线, 同时作为第二级二极管的阴极发射电子在主阳极上形成韧致辐射, 两级二极管产生的韧致辐射在空间上叠加, 从而形成高强度大面积均匀的 X 射线. 在串级二极管末端设计了真空筒, 与现有的二极管腔体连接, 能注量测量探头置于真空筒的中心位置, 信号通过筒体末端的真空电缆阵列引出, 降低了二极管末端的真空封板对能注量测量结果的影响. 将 LiF 热释光剂量片贴于光电管前端, 用于监测该处的剂量 D (rad). 通过改变闪烁体及挡光材料的厚度、系统与光源的距离等参数, 进行了多轮实验. 图 4 为能注量测量的实验框图, 图 5

表 3 探测器在不同能量下的灵敏度

Table 3. Sensitivity of the detector at different energies.

| 靶材 | 光谱仪电压/kV | 光谱仪电流/mA | X射线能量/keV | 本底电流/nA | 输出电流/nA | 剂量率/mGy·s ⁻¹ | 灵敏度/ $10^{-17} \text{ C} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{MeV}^{-1}$ |
|----|----------|----------|-----------|---------|---------|-------------------------|---|
| Pb | 100 | 25 | 75.0 | 3.9 | 24.2 | 8.78 | 5.29 |
| W | 95 | 30 | 59.2 | 2.2 | 11.9 | 3.25 | 6.79 |
| Dy | 75 | 35 | 46.0 | 3.7 | 29.4 | 50.77 | 3.87 |
| Sn | 50 | 60 | 25.3 | 3.9 | 26.7 | 55.77 | 3.13 |

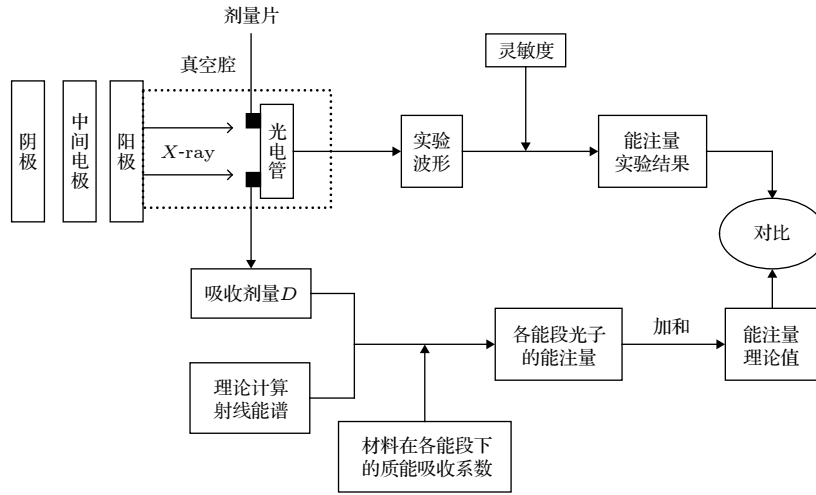


图 4 能注量测量实验框图

Fig. 4. Experimental diagram of energy fluence measurement.

表 4 连续 5 次实验的能注量测量结果

Table 4. Measurement results of energy fluence in five successive experiments.

| 发次 | 二极管电压/kV | 二极管电流/kA | 剂量/rad | 能注量/mJ·cm ⁻² |
|-----|--------------|-------------|--------------|-------------------------|
| 1 | 705 | 311 | 415.6 | 36.0 |
| 2 | 741 | 315 | 342.4 | 35.0 |
| 3 | 686 | 323 | 293.4 | 37.0 |
| 4 | 746 | 327 | 309.3 | 36.6 |
| 5 | 718 | 305 | 325.6 | 34.8 |
| 平均值 | 719.2 ± 25.0 | 316.2 ± 8.9 | 337.3 ± 47.4 | 35.9 ± 1.0 |

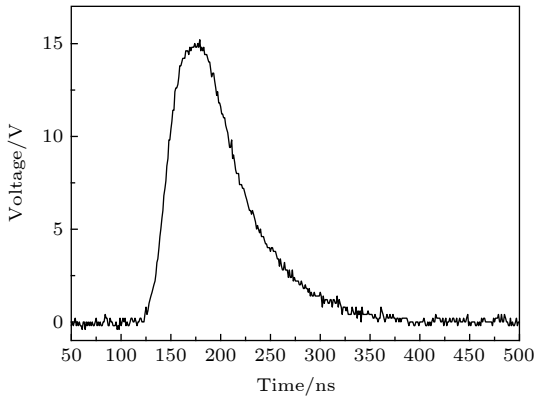


图 5 能注量测量典型波形

Fig. 5. Typical waveform of energy fluence measurement.

为能注量测量典型波形. 依据 (1) 式和 (2) 式, 结合实验波形的幅值、半高宽及匹配电阻 (50 Ω) 即可计算得到射线的能注量, 表 4 列出在“闪光二号”加速器上连续 5 发次实验测量结果.

表 4 显示, 连续 5 次测量结果平均值为 35.9 mJ/cm². 如前言所述, 脉冲硬 X 射线的能注量可以采用能谱和剂量值, 根据能注量和吸收剂量的关系折算得到, 作为实测值的验证.

能注量 \bar{E} (单位面积上入射的能量, mJ/cm²) 与剂量 D (rad) 有如下关系:

$$\bar{E} = \frac{D}{\mu_{\text{en}}/\rho}, \quad (3)$$

μ_{en}/ρ 为材料的质能吸收系数, 在 (2) 式中已有所描述. 由于材料在不同光子能量下的质能吸收系数不同, 需将射线按其能谱分布划分为若干能段, 分别计算每个能段下的能注量, 并最终加和, 总的能注量可表达为

$$\bar{E} = \int \frac{D(E)}{\mu_{\text{en}}(E)/\rho} dE = \sum_i \frac{D(E_i)}{\mu_{\text{en}}(E_i)/\rho}. \quad (4)$$

表 5 是根据实测剂量和能谱计算得到的能注量, 理论计算值为 39.8 mJ/cm².

可以发现, 实验结果比理论值小约 9.8%, 分析其原因如下: 由射线在物质中的指数衰减规律可知, 实际上闪烁体是无法做到射线全吸收的, 总存在一部分射线穿过去, 这部分能量无法探测到, 导致实验结果偏小; 由于准单能标定源的能量点有限, 将光子平均能量下的灵敏度作为探测器的灵敏度, 存在一定的不确定度; 再者, 为了减少可见光的

表 5 脉冲硬 X 射线能注量理论值
Table 5. Theoretical values of pulsed hard X-ray energy fluence.

| 能量/keV | 15 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 能谱归一化数值 | 0.1174 | 0.2260 | 0.2110 | 0.1465 | 0.1104 | 0.0865 |
| 质能吸收系数/cm ² ·kg ⁻¹ | 9790 | 4080 | 143 | 69 | 69 | 69 |
| 能注量/ mJ·cm ⁻² | 0.04761 | 0.21996 | 5.85906 | 8.43404 | 6.35475 | 4.97756 |
| 能量/keV | 180 | 210 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| 能谱归一化数值 | 0.0533 | 0.0319 | 0.0103 | 0.0036 | 0.0021 | 0.0004 |
| 质能吸收系数/cm ² ·kg ⁻¹ | 29.1 | 29.1 | 29.1 | 29.1 | 29.1 | 29.1 |
| 能注量/ mJ·cm ⁻² | 7.27554 | 4.36081 | 1.41793 | 0.49708 | 0.29262 | 0.06403 |

影响, 增加信噪比, 实验中使用了黑卡纸和减光片, 它们对射线有一定的衰减作用, 导致部分射线未照射到闪烁体上.

6 结 论

本文重点介绍了一套适应于脉冲硬 X 射线能注量的测量系统. 通过理论模拟, 结合待测束流强度确定了测量系统的组成. 在标准单能 X 射线源上标定了探测器的灵敏度, 为实验的绝对测量提供了有力数据. 测量了以“闪光二号”加速器为实验平台的脉冲硬 X 射线源的能注量, 结合探测器的灵敏度, 经计算, X 射线的能注量为 35.9 mJ/cm², 与理论计算结果基本一致. 该测量技术的成功应用为以后类似的研究提供了很好的实验方法, 也可以为 X 射线强度分析研究提供参考.

参考文献

[1] Failor B H, Coverdale C A 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 569
 [2] Wang Y Q, Hu G Y, Zhao B, Zheng J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 104202 (in Chinese) [王雅琴, 胡广月, 赵斌, 郑坚 2017 物理学报 **66** 104202]
 [3] Qi J C, Ye L L, Chen R C, Xie H L, Ren Y Q, Du G H, Deng B, Xiao T Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104202 (in Chinese) [戚俊成, 叶琳琳, 陈荣昌, 谢红兰, 任玉琦, 杜国浩, 邓彪, 肖体乔 2014 物理学报 **63** 104202]
 [4] Hazelton R C, Yadlowsky E J, Moschella J J 2003 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **31** 1355
 [5] John E, R, Miriam G R, Arnold B 2003 *Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics V*. San Diego, California, USA, August 3, 2003 p334
 [6] Meachum J S, Childers F K, Riordan J C 1991 *Proceedings of the 8th IEEE International Pulsed Power Conf.* San Diego, California, USA, June 16–19, 1991 p571
 [7] Ware K D, Bell D E, Gullickson R L 2001 *Proceedings of the 13th IEEE International Pulsed Power Conf.* Las Vegas, Nevada, USA, June 17–22, 2001 p350
 [8] Pellinen D, Ashby S, Gillis P, Nielsen K, Spence P 1979

Proceedings of the 2nd IEEE International Pulsed Power Conf. Lubbock, Texas, USA, June 12, 1979 p410
 [9] Knai B, Qiu A C, Wang L P, Lin D S, Cong P T, Liang T X 2005 *High Power Las. Part. Beam.* **17** 1739 (in Chinese) [蒯斌, 邱爱慈, 王亮平, 林东生, 丛培天, 梁天学 2005 强激光与粒子束 **17** 1739]
 [10] Li J X, Wu W, Lai D G, Cheng Y H, Ma L, Zhao M, Guo J H, Zhou H 2014 *High Power Las. Part. Beam.* **26** 035005 (in Chinese) [李进玺, 吴伟, 来定国, 程引会, 马良, 赵墨, 郭景海, 周辉 2014 强激光与粒子束 **26** 035005]
 [11] Ji C S 1990 *Handbook of Nuclear Radiation Detectors and Their Experiment Techniques* (Beijing: Atomic Energy Press) p61 (in Chinese) [汲长松 1990 核辐射探测器及其实验技术手册 (北京: 原子能出版社) 第61页]
 [12] Su Z F, Lai D G, Qiu M T, Ren S Q, Xu Q F, Yang S 2020 *High Power Las. Part. Beam.* **32** 035005 (in Chinese) [苏兆锋, 来定国, 邱孟通, 任书庆, 徐启福, 杨实 2020 强激光与粒子束 **32** 035005]
 [13] Kirkby C J 2005 *Ph. D. Dissertation* (Canada: University of Alberta)
 [14] Wesley P, Aparecido A C, Walter K S, et al. 2010 *Instrum. Sci. Technol.* **38** 210
 [15] Zhang X H, Zhao B S, Miao Z H, Zhu X P, Liu Y A, Zou W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4238 (in Chinese) [张兴华, 赵宝升, 缪震华, 朱香平, 刘永安, 邹玮 2008 物理学报 **57** 4238]
 [16] Ding H L 2010 *Nuclear Radiation Detectors* (Harbin: Harbin Institute of Technology Press) p103 (in Chinese) [丁洪林 2010 核辐射探测器 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社) 第103页]
 [17] Nitzan M, Mahler Y, Bodenheimer J S, Siew F P 1983 *IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-30* 737
 [18] Horiai T, Kurosawa S, Murakami R, Yamaji A, Shoji Y, Ohashi Y, Pejchal J, Kamada K, Yokota Y, Yoshikawa A 2017 *J. Cryst. Growth* **468** 391
 [19] Niu S L, Lei L F, Zhao J, Zhang D H 2003 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **23** 129 (in Chinese) [牛胜利, 雷林峰, 赵军, 张殿辉 2003 核电子学与探测技术 **23** 129]
 [20] Song C H, Guan X Y, Dai Q H, Wang K L, Liu J Y 2004 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **38** 223 (in Chinese) [宋朝晖, 管兴胤, 代秋声, 王奎禄, 刘俊勇 2004 原子能科学技术 **38** 223]
 [21] Ren G H, Wang S H, Li H Y, Lu S 2003 *J. Inorg. Mater.* **18** 269 (in Chinese) [任国浩, 王绍华, 李焕英, 陆晟 2003 无机材料学报 **18** 269]
 [22] Zhou H Y, Zhu X D, Zhan R J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1620 (in Chinese) [周海洋, 朱晓东, 詹如娟 2010 物理学报 **59** 1620]
 [23] Zhang X P, Ouyang X P, Zhang Z B, Tian G, Chen Y L, Li D H, Zhang X D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 82 (in Chinese) [张显鹏, 欧阳晓平, 张忠兵, 田耕, 陈彦丽, 李大海, 张小东 2008 物理学报 **57** 82]

Energy fluence measurement for pulse hard X-ray*

Su Zhao-Feng[†] Lai Ding-Guo Qiu Meng-Tong

Xu Qi-Fu Ren Shu-Qing

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect,

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 7 November 2019; revised manuscript received 9 March 2020)

Abstract

Pulsed high-energy fluence X-ray source is based on the “Flash II” accelerator. It can be used to carry out effect vulnerability and sensitivity test of unit level system generated electromagnetic pulse (SGEMP). The energy fluence of pulsed hard X-ray is a main parameter of the equipment beam. At present, theoretical calculation method is widely used. Energy fluence can be calculated according to the dose, energy spectrum and energy absorption coefficient of each energy segment.

The principle measuring energy fluence of pulsed hard X-ray by total absorption method is introduced. The photoelectric cell with lutetium silicate (LSO) scintillator is selected as a core component of the detection system, and the measurement system is developed. It is composed of scintillation detector, LSO scintillator, dimmer film, photon collimator, visible light shielding material, power supply and signal collecting system. The conversion coefficient between the incident photon energy and the waveform parameter is calibrated by a standard X-ray source.

The energy fluence measurement experiment is carried out with the high-energy beam source of the “Flash II” accelerator as an experimental platform. In order to meet the requirements of the effect test experiments, the series diode structure is used in the accelerator for forming a high strength and large area uniform X-ray source. In the experiment, the LiF TLD is located in the front of the phototube and used to monitor the dose. According to the measured waveform, the actual energy of the incident photons is calculated. Combined with the receiving area of incident photons, the energy fluence of pulsed hard X-ray is calculated. The average measured value is 35.9 mJ/cm² in 5 consecutive experiments. Energy fluence calculated from the measured dose and energy spectrum is 39.8 mJ/cm². The results of the two methods are compared.

It can be found that the experimental result is about 9.8% smaller than the theoretical value. The reasons are as follows. According to the law of exponential decay of rays in matter, in fact, the scintillator cannot absorb all the rays, and some of the rays can penetrate through, the energy of these rays cannot be detected, and thus giving rise to small experimental value. Due to the limited energy point of quasi-monoenergetic source, the sensitivity under the mean photon energy is taken as the sensitivity of the detector, and therefore there is a certain degree of uncertainty.

The successful application of the measurement technology provides a good experimental method for the following similar research, and can also provide a reference for X-ray intensity analysis.

Keywords: pulse hard X-ray, energy fluence, scintillation probe, lutetium silicate scintillator

PACS: 52.59.Px, 52.70.La, 29.40.Mc

DOI: 10.7498/aps.69.20191700

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875214).

[†] Corresponding author. E-mail: xcw9504@163.com