

成像板对 X 射线的能量响应

骆志平^{1,2,3}, C. Suzuki⁴, T. Kosako⁴, 马吉增¹

(1. 中国原子能科学研究院 辐射安全研究部, 北京 102413; 2. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006;
3. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 4. 东京大学, 日本 东京 1130032)

摘要:作为 X 射线探测器, 成像板的光激发光子信号对 X 射线的能量响应是非常重要的数据。利用同步辐射光源的单能 X 射线照射成像板, 得到成像板对低能光子的能量响应曲线, 并与 MCNP 程序计算结果进行对比分析, 得到成像板响应函数的衰减模型。计算结果与实验结果一致, 为进一步开展成像板在辐射测量领域的研究工作提供了参考。

关键词:成像板; 能量响应; X 射线; 衰减模型

中图分类号: TL816.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)07-0644-04

Energy Response of Imaging Plate for X-ray

LUO Zhi-ping^{1, 2, 3}, C. Suzuki⁴, T. Kosako⁴, MA Ji-zeng¹

(1. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-24, Beijing 102413, China;*
2. *China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;*
3. *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
4. *University of Tokyo, Tokyo 1130032, Japan*)

Abstract: As an ionizing radiation detector, the photo stimulated luminescence response for low energy photons is a fundamental data for imaging plate. The experiment was arranged in the synchrotron radiation center in High Energy Accelerator Research Organization, to get the response data using low energy mono-energetic X-ray. The calculation results were also achieved by Monte-Carlo method, based on a newly developed decay model. The two results show good consistence, which can be used as reference for further research.

Key words: imaging plate; energy response; X-ray; decay model

成像板于 20 世纪 70 年代由富士胶片公司为医学 X 射线成像而开发^[1]。成像板具有高灵敏度、线性范围宽、探测面积大、位置灵敏度高及操作简单等优点, 被广泛应用于材料结构分析、生命科学研究及辐射测量等领域。

成像板用于辐射测量时, X 射线的能量响应(对于不同能量的 X 射线、入射光子在单位面积的成像板中产生的信号)是非常重要的数据。成像板用于带电粒子束在物理体模中产生的剂量分布测量时, 因成像板的材料并非组织

等效,直接测量得到的信号分布与实际吸收剂量分布有一定偏差^[1]。如果已知成像板对带电粒子能量响应或该响应的计算方法,并可计算出入射粒子能量随深度的分布,则可得到成像板不同位置的记录信号与该位置处吸收剂量之间的校正因子,对成像板得到的信号分布进行校正。

1 成像板结构

成像板结构示于图 1^[2]。

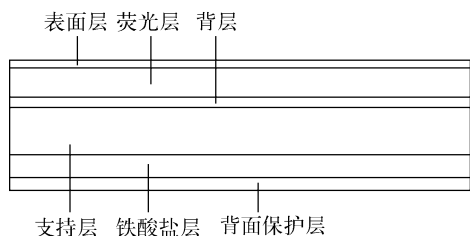


图 1 成像板结构示意图

Fig. 1 Scheme of imaging plate structure

表面层为聚乙烯对苯二酸酯,用于保护荧光层,避免荧光层在使用过程中受到损伤。

荧光层是成像板的信号记录层,荧光层材料为掺杂了微量 Eu^{2+} 的卤氟化钡晶体 (BaFX ; Eu^{2+} , $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 和聚氨酯的混合物。卤氟化钡晶体为辉尽性荧光物质, Eu^{2+} 为发光中心,晶体粒径约为 $5 \mu\text{m}$ 。当 X 射线入射时,通过光电效应或康普顿散射效应等产生的电子在荧光层产生电离激发,晶体中部分 Eu^{2+} 失去电子变成 Eu^{3+} 。失去的电子进入导带,导带中的自由电子被卤素离子的空穴俘获,形成亚稳态的色彩中心。辐照完成后,当利用波长为 633 nm 的氦氖激光对成像板进行扫描时,色彩中心俘获的电子受到激发,重新释放到导带,或被 Eu^{3+} 吸收,形成处于激发态的 Eu^{2+} 。处于激发态的 Eu^{2+} 退激发出波长为 390 nm 的光激发光子 (PSL), PSL 被光电倍增管探测。用单位面积中探测到的 PSL 表征成像板信号强弱,单位为 mm^{-2} 。利用激光束对成像板扫描读出时,读出密度可在每毫米 $5\sim 40$ 像素范围内选择。因此,成像板的位置分辨率取决于读出设备中扫描激光束的大小^[2-3]。

支持层用于支持荧光层,为聚乙烯对苯二

酸酯,卤氟化钡晶体颗粒被均匀地涂在支持层上。支持层还有保护荧光层的作用,具有较好的机械强度和柔韧性。

此外,成像板还包含背层、铁酸盐层及背面保护层,起到辅助成像或结构保护的作用。成像板的总厚度约为 $430 \mu\text{m}$ 。

2 X 射线能量响应测量

在日本高能加速器研究机构 (KEK) 的同步辐射光源上对成像板的 X 射线能量响应曲线进行测量。使用的单能 X 射线能量为 $10\sim 60 \text{ keV}$,成像板型号为 BAS-MS2025,读出设备型号为 BAS2000。测量系统示于图 2。

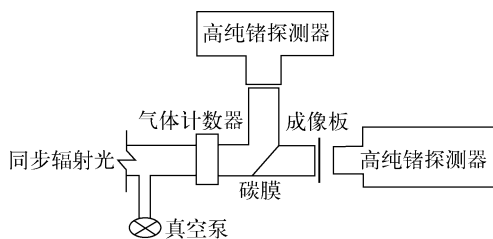


图 2 测量系统示意图

Fig. 2 Scheme of measurement system

由同步辐射光源引出的单能 X 射线沿真空管道通过气体计数器到达碳膜表面后,部分发生散射,被垂直方向的高纯锗探测器测量(用于监测通道中 X 射线的能谱)。大部分光子穿过碳膜,对成像板进行照射,并被水平方向的高纯锗探测器测量。将成像板裁剪成 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的小片,用铝箔包裹避光,置于射线管道末端。

在将成像板置于射线通道末端被照射前,需已知在单能基准场条件下,水平方向照射到成像板表面的光子数与气体计数器计数的关系,得到不同能量下的该转换因子,即通过气体计数器的计数,得到到达成像板表面的光子数。

成像板被照射后放置 24 h ,信号衰减基本稳定后读取,得到的相对测量结果示于图 3。

3 X 射线能量响应蒙特卡罗计算

利用 MCNP 程序计算成像板探测器对不同能量射线的响应,并与实验测量结果进行比较。成像板结构参数列于表 1。

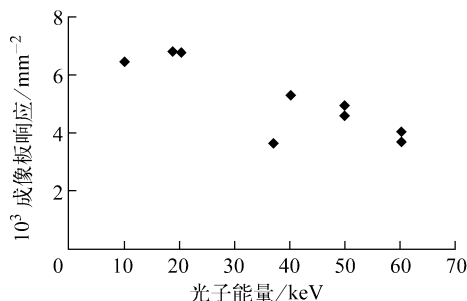


图3 成像板对X射线能量响应测量结果

Fig. 3 Measurement results of X-ray energy response

考虑成像板信号的如下读出过程:射线在荧光层沉积能量后,用 He-Ne 激光束扫描,处于激发态的 Eu^{2+} 退激发光被光电倍增管测量。随着沉积能量位置在荧光层中厚度的加深,因成像板本身对光子散射或吸收的影响,到达该位置处的激光光子数目呈指数衰减;同时, Eu^{2+} 退激发光产生的光子到达表面层被光电倍增管测量的份额也呈指数衰减。能量沉积衰减模型(沉积能量与成像板信号的关系)示于图 4。

表 1 成像板结构参数

Table 1 Parameters of imaging plate structure

成像板结构	厚度/ μm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	材料
表面层	9	1.4	聚乙烯对苯二酸酯
荧光层	115	3.3	BaFX:Eu ²⁺ (X=Cl, Br, I) 及聚氨酯混合物
背层	12	1.4	塑料
支持层	190	1.4	聚乙烯对苯二酸酯
铁酸盐层	80	3.0	MnO, ZnO, Fe ₂ O ₃ 及塑料
背面保护层	25	1.4	聚乙烯对苯二酸酯

假设该衰减可用式(1)表示:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

其中: I_0 为荧光层一定深度位置处的沉积能量; I 为该位置处沉积能量对成像板信号输出的贡献, mm^{-2} ; μ 为该贡献沿着深度方向的衰减系数; x 为荧光层的深度。

将成像板的荧光层划分成 $5 \mu\text{m}$ 厚的 23 层,对每一层采用指数衰减加权,取 $\mu = 0.016$ 时,得到图 5 所示的计算结果。由图 5 可见:根据能量沉积计算的结果比实验测量的结果大,

且随着能量的增大,成像板的能量响应逐渐减小,成像板输出信号的计算值与实验值的相对差异也逐渐增大,这也是指数衰减模型作用下的结果;根据能量沉积衰减模型计算的结果与实验结果符合得很好。

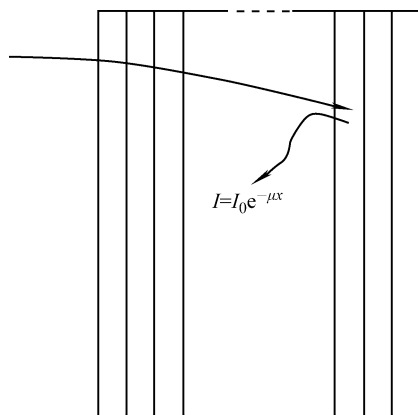


图 4 成像板荧光层衰减模型

Fig. 4 Scheme of decay model

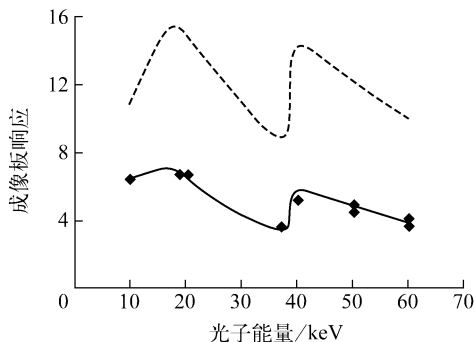


图 5 成像板对 X 射线能量响应蒙特卡罗计算结果与实验结果比较

Fig. 5 Comparison of calculation results and experiment results

纵坐标为相对值,以能量为 10 keV 的点为基准归一

◆——实验测量值;虚线——根据能量沉积计算值;

实线——根据能量沉积衰减模型计算值

随着入射光子能量的增大,光子与荧光层材料原子作用截面迅速减小,在低能部分,成像板对 X 射线的能量响应表现出先增加后减小的趋势,且在能量为 17.5 keV 时达到极大值。在能量约为 37.5 keV 处,能量响应表现出一峰值,这与荧光层晶体中 Ba 原子与光子的光电作用截面数据有关。在 37.5 keV 处, Ba 原子有一明显光电共振吸收峰,这导致入射光子在

荧光层中沉积能量增大,从而产生更大的退激发光信号。

4 结语

成像板自被应用于辐射测量领域以来,在自动射线成像、放射性活度测量、剂量分布测量及中子成像相关测量方面有很大的进展^[4-6]。为针对不同能量的入射射线开展更为细致的成像板应用研究,并加深对成像板进行辐射测量时工作原理的理解,成像板对 X 射线能量响应的测定与计算很有必要。

本工作利用同步辐射光源的单能光子测量了成像板对于 X 射线的能量响应,并借助 MCNP 程序对 X 射线能量响应进行模拟计算,提出计算过程中的沉积能量衰减模型。研究结果为将来成像板用于低能放射性核素污染测量或体内低能放射性核素定量测量等领域奠定基础。

参考文献:

[1] AMEMIYA Y, MIYAHARA J. Imaging plate illuminates many fields[J]. *Nature*, 1988, 336:

89.

- [2] Fujifilm Corporation. Principle of imaging plate methodology[R/OL]. [2009-01-10]. http://www.fujifilm.com/products/life_science/si_imgplate/whatis03.html.
- [3] SONODA M, TAKANO M, MIYAHARA J, et al. Computed radiography utilizing scanning laser stimulated luminescence[J]. *Radiology*, 1983, 148: 833-838.
- [4] HIROTA M, SAZE T, OGATA Y, et al. Feasibility of in vivo thyroid ¹³¹I monitoring with an imaging plate[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2001, 55: 513-516.
- [5] HAYAKAWA Y, AMEMIYA Y, TADA J, et al. Application of an imaging plate to dose distribution measurement of proton beam[J]. *Nucl Instrum Methods A*, 1996, 378: 627-628.
- [6] MASUMOTO K, IJIMA K, TOYODA A, et al. Evaluation of imaging plate technique coupled with activation detector as the passive neutron monitor [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007, 271: 297-303.