

文章编号:1004-4213(2011)11-1751-4

塑料闪烁光纤阵列成像探测器在 高能 X 射线 辐照下的串扰分析

马庆力¹, 唐世彪², 许士敏¹, 党双平¹, 邹继伟¹

(1 电子工程学院 电子系, 合肥 230038)

(2 中国科技大学 近代物理系, 合肥 230026)

摘要:采用蒙特卡罗方法对闪烁光纤阵列探测器在 高能 X 射线入射下的串扰进行了模拟研究, 并且分析比较了加铅层对串扰的影响. 研究中采用对表征成像系统空间分辨率参量——调制传递函数进行模拟分析和比较, 得到在光纤阵列之间加入不同铅层厚度后对系统调制传递函数参量曲线的影响. 研究表明:在 高能射线下, 采用闪烁光纤阵列作为成像探测器存在严重的次级粒子相互串扰的现象, 而在阵列之间加入铅介质能够减少这种效应; 但另一方面, 若所加铅层太厚又会导致成像探测器像素过大而使得空间分辨率下降. 通过模拟计算得出:只要在阵列之间加入适当厚度的铅介质, 既可以有效抑止阵列之间次级粒子的串扰, 同时又能提高闪烁光纤阵列探测器系统的空间分辨率.

关键词:闪烁光纤阵列; 成像探测器; 铅层; 串扰

中图分类号: OTN25; TP751

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114011.1751

0 引言

采用胶片成像的传统高能射线成像探测器探测效率较低, 而通过增加胶片厚度来增强探测效率的同时会导致图象的空间分辨率下降^[1]. 因此在高能下, 胶片作为成像探测器并不理想, 而闪烁光纤则恰好解决了这一矛盾. 增加闪烁光纤阵列的长度可提高探测效率, 同时对图象的空间分辨率没有太大影响^[2-3]. 闪烁光纤阵列探测器由许多作为像素单元的单根闪烁光纤整齐排列而成的, 即每个像素单元都具有独立的闪烁光纤结构. 每根闪烁光纤独立承担产生可见光和光导的作用, 并受每根光纤 Clad 包层和 EMA(Extra Mural Absorber)的作用, 其内部产生的可见光光子沿着单根光纤向两端传输^[4]. 因此从理论上说, 闪烁光纤成像探测器空间分辨率是由每个光纤大小所决定的. 换言之, 仅通过增加光纤长度来增加吸收效率, 并不会影响探测器的空间分辨率^[3].

但是实际上, 闪烁光纤阵列成像探测器的空间分辨率并不只是取决于探测器像素单元的大小, 即闪烁光纤大小, 还与阵列中光纤之间的粒子串扰程度有紧密联系. 在 高能 X 射线入射下, 闪烁光纤的

Clad 包层和 EMA 吸收层不能完全把侧向的散射光子吸收, 而是与阵列中邻近的某根闪烁光纤发生作用而产生可见光子, 这部分由于侧向散射光子而导致的输出可见光子就是光纤之间的串扰. 本文利用 Geant4^[5-6] 工具模拟了高能下光纤阵列探测器的串扰, 并在此基础上提出利用铅层抑制串扰的思想.

1 串扰的影响

计算中选择的闪烁光纤型号为意大利 Bicron 公司生产的 BCF-20^[4], 光纤纤芯(core)材料为聚苯乙烯(单体分子式为 $C_6H_5CH=CH_2$, 密度为 1.032 g/cm^3 , 折射率为 1.6), 包层(clad)材料是聚乙烯醇(单体分子式为 $CH_2=CHOH$, 密度为 1.26 g/cm^3 , 折射率为 1.49), 一般闪烁光纤包层材料厚度为纤芯直径的 3%~5%. BCF-20 可产生 2.5 eV, 波长峰值为 492 nm 的可见光子, 每 1 MeV 的能量沉积产生 8 000 个可见光子, 衰减时间是 2.7 ns. 为理论计算光纤在 高能 X 射线辐照下的特性, 结合 GEANT4 模拟系统的优势, 以单根光纤作为探测单元. 简化的几何结构如图 1, 图中只画出中心一根光纤, 模拟中采用 20×20 根光纤.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60602065)、安徽省自然科学基金(No. 11040606M148)和中国博士后科学基金资助

第一作者:马庆力(1975—),男,讲师,博士,主要研究方向为核信息处理和核电子学. Email: maql@ustc.edu.cn

收稿日期:2011-06-03;修回日期:2011-07-26

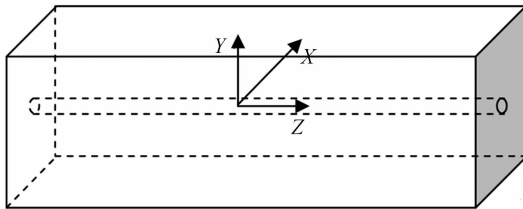


图1 探测器几何结构示意图

Fig.1 Geometry structure diagram of the detector

图中光纤的几何中心与探测器空间(长方体)的几何中心相重叠,直角坐标系如图中所示,其中 Z 轴沿光纤中心轴向, X 轴和 Y 轴则是沿光纤径向.对于辐射源的位置选取沿 Z 轴方向对准光纤探测器中心位置,距离探测器表面距离为10 cm.

首先需要清楚在高压下,闪烁光纤阵列探测器中的串扰是否严重.模拟中采用了两种不同能量的入射光子对准光纤阵列中的某一根光纤入射的情况,然后计算出阵列中所有闪烁光纤的能量沉积大小,以比较这两个不同入射能量时,阵列中光纤之间的串扰程度大小.

图2为入射能量分别为1 MeV和4 MeV入射

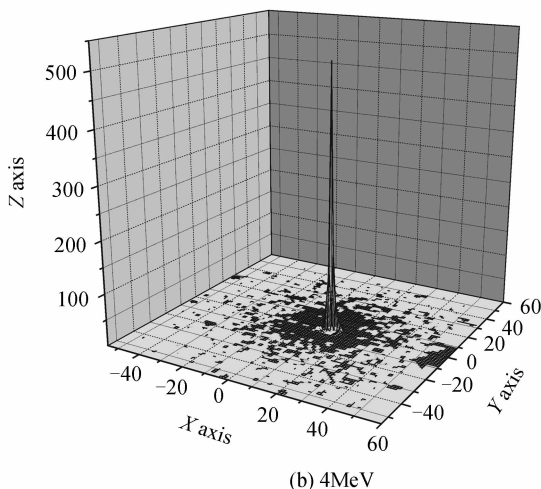
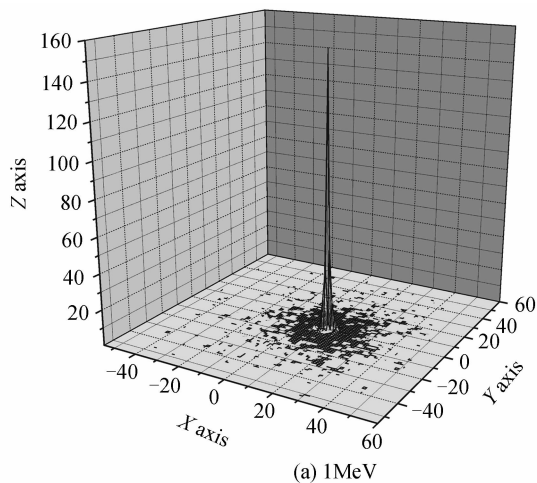


图2 1 MeV和4 MeV入射能量下的串扰程度比较

Fig.2 Comparison of cross-talk under 1 MeV and 4 MeV incident energy

光子对准阵列其中一根光纤时产生的串扰的比较.图中 Z 轴为对应 XY 平面上闪烁光纤的能量沉积值, XY 轴为光纤阵列的平面位置坐标.图中能量沉积值较大的对应为入射光纤位置以及周围邻近光纤的位置.从图中 XY 平面看到,入射能量较大时,能量沉积分布较广,即阵列中产生能量沉积的光纤数目较多,有可见光子输出的光纤数目较多,这样表明阵列的串扰程度较大.因此采取措施抑止或避免串扰对于高能成像具有重要的意义.

串扰极大的影响图像对比度和空间分辨率,因此应该尽量避免串扰的发生.在模拟中,能够比较容易的在结构上对一般闪烁光纤阵列进行一些改造,本文主要是改变闪烁光纤之间的介质,由原来的空气变为铅,以吸收侧向散射光子,从而来检验是否对抑止串扰有所贡献,使得图像质量有所提高.这在闪烁光纤阵列探测器在高能成像领域是一种新的尝试^[7-8].

2 模拟结果及分析

被测物体为5层不同厚度的金属块模型,通过Geant4建立的成像系统模型如图3.

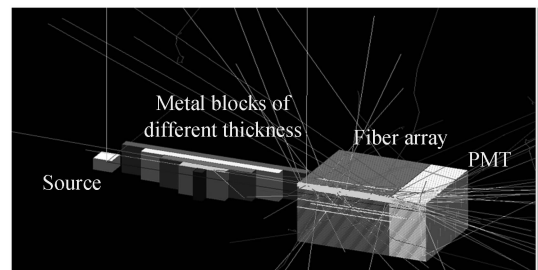
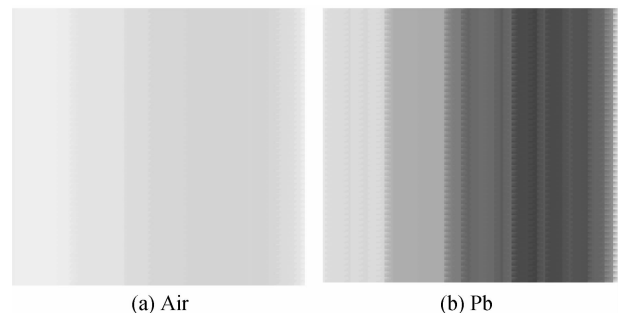


图3 基于Geant4的模拟分析模型图

Fig.3 Simulation model in Geant4

通过图3所示的成像系统模拟得到原始数据,然后利用一个DR(Digital Real Time Radiography)图像重建软件得到最后的图像.图4是闪烁光纤阵列之间分别采用空气介质和铅介质后所成被测物体图像的比较.从图中看出在采用铅介质后,图像的对比度和空间分辨率都较好于空气介质时的图像质量.

图4 闪烁光纤阵列中为空气介质和铅介质的图像质量对比
Fig.4 Imaging quality comparison of the air and the Pb

从模拟中看出加入铅介质后确实有助于串扰的抑制,对空间分辨率有所贡献,但加入铅介质的厚度将是下一步面临的问题.模拟中采用调制传递函数(Modulate Transfer Function, MTF)来分析铅介质厚度对成像质量的影响. MTF 是不同图像空间频率下成像系统的响应函数,它用来衡量比较图像系统的空间分辨率.它也是描述数字成像系统的最好工具. MTF 是点扩展函数(Point Spread Function, PSF)傅里叶变换的标准定义.它是一个二维量,对应于二维图像,但在实际测量时,本文仅仅单独考虑一个方向,即仅对图像做一维处理.获得图像 MTF 方法一般有四种:针孔照相机法、台阶照相机法、狭缝照相机法和分辨率板照相机法^[9].在此研究中采用了台阶法测量光纤阵列系统的 MTF 值. PSF(用 h 表示)、线扩展函数(Line Spread Function, LSF)(用 L 表示)和 MTF(用 I 表示)是描述成像系统空间分辨率的最科学的参量^[10]. PSF 和 MTF 可独自表述成像系统的质量,它们之间可相互转换,两者是傅里叶变换对.即

$$\text{PSF} \begin{matrix} \xrightarrow{F[\cdot]} \\ \xleftarrow{F^{-1}[\cdot]} \end{matrix} \text{MTF} \quad (1)$$

LSF 也是描述成像系统质量的特征量.它与 PSF 之间存在投影关系

$$L(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dy \quad (2)$$

如果 $h(x, y)$ 是旋转对称的,投影的方向就可以是任意的.理想的台阶经射线透视成像后在像面上的像将是退化了的具有模糊边缘的台阶像,其中就包含有成像系统的 PSF 信息.设理想直角台阶函数为

$$S_t(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

那么,台阶样品经射线透射照相模糊像为

$$I_{st}(x) = S_t(x)h(x, y) \quad (4)$$

是理想台阶像与 PSF 的卷积.把式(3)代入式(4),整理得

$$I_{st}(x) = S_t(x) * h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} S_t(x)h(\tau-x, y) \cdot dy dx = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dy \right] dx = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) dx \quad (5)$$

再对式(5)微分可得 LSF 为

$$L(x) = \frac{d}{dx} [I_{st}(x)] \quad (6)$$

根据上述原理,只要测出成像系统中得 LSF、PSF 或 MTF 中得任何一个,就可以求出其它两个.对由闪烁光纤阵列成像系统得到的台阶模糊像剖面线求导得到成像系统的 LSF;对其做投影得到 PSF;再对 PSF 傅里叶变换,求出 MTF;最后由 MTF 得

到成像系统的空间分辨率.

由于 MTF 不仅受到闪烁光纤之间的散射光子的影响,还受一个比值 R 的影响. R 值的定义为

$$R = \frac{S_{\text{fiber}}}{S_{\text{array}}} \quad (7)$$

式中 S_{fiber} 为所有光纤所占的截面面积, S_{array} 为整个光纤阵列所占的截面面积. R 值越大,对 MTF 越有利.

对于铅介质厚度的定义如图 5.

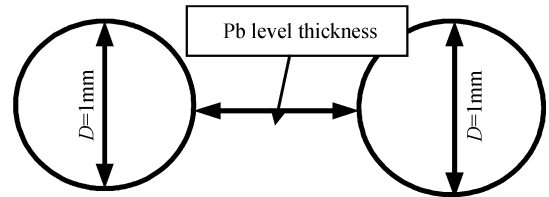


图 5 闪烁光纤阵列中铅介质厚度的定义

Fig. 5 Definition of the Pb level thickness between two fibers

由式(7)得知,当铅介质厚度过大, R 值减小,则对 MTF 产生影响.因此,要达到加入铅介质后既能因减小串扰而提高图像质量,又不能因 R 值的减小而降低图像质量,必须在这中间找到一个平衡点.本文选取了几个不同厚度的铅介质来模拟 12 MeV 入射下的 MTF,并与空气介质情况下的 MTF 进行比较.图 6 为模拟结果.

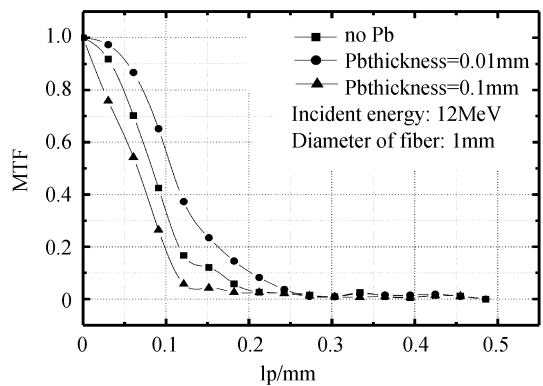


图 6 阵列中不同铅介质厚度下的 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve for different Pb level thickness in fiber array

从图中看到,当铅介质厚度为 0.01 mm,即光纤直径的 1%时,其空间分辨率 MTF 比空气介质下的 MTF 较好;而当铅介质厚度为 0.1 mm,即光纤直径的 10%时,空间分辨率较空气介质情况下较差.这说明在闪烁光纤阵列中加入铅介质后对抑制串扰,提高图像空间分辨率是具有积极的作用的,但同时铅介质的厚度又不宜过大,否则将反而起到降低空间分辨率的消极作用,这作为成像探测器显然是不利的.此结论对于下一步实现闪烁光纤阵列探测器的优化设计提供了理论指导.

3 结论

高能射线条件下,由于闪烁光纤材料本身的原因导致探测效率并不高,而通过增加入射光子强度和增加光纤长度等措施能够加以改善.在利用闪烁光纤的这一优势的同时,还可以对阵列在某些结构上进行改进,避免一些由于这种阵列结构带来的类似串扰这样问题的影响.通过对光纤阵列之间的串扰分析,本文设计了一种在阵列之间加入铅介质的方法来减少串扰并得到模拟结论的验证.之后进而又通过模拟计算,对此改造方案进行定量的评估,得到铅介质的理想厚度,从而得到一些指导性的参量,对下一步的实验工作提供了理论指导.

参考文献

- [1] FLOYD C E, BENDER J E, SHARMA A C, *et al.* Introduction to neutron stimulated emission computed tomography[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, **51**(14): 3375-3390.
- [2] MA Qing-li, NASSERI M M, YIN Ze-jie, *et al.* Analysis of possibility about imaging using plastic scintillating fFiber array for high-energy incident beam[J]. *Nuclear techniques*, 2005, **28**(7): 557.
马庆力, Nasser M M, 阴泽杰, 等. 闪烁光纤阵列用于高能射线成像的可行性研究[J]. *核技术*, 2005, **28**(7): 557.
- [3] NASSERI M M, MA Qing-li, YIN Z, *et al.* Low energy X-ray imaging using plastic scintillating fiber: a simulation study [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2005, **234**(2): 362.
- [4] Bicon Corporation, Scintillation Products-Plastic Scintillating Fibers[EB/OL]. 2000-08-11 [2010-05-23], available from: <http://www.bicon.com>.
- [5] UHLMAN N, WOLFEL S, PAULI J, *et al.* 3D-position-sensitive compact scintillation detector as absorber for a compton-camera[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, **52**(31): 606-611.
- [6] MELNYK R, DIBIANCA F A. Monte carlo study of X-ray cross-talk in a variable resolution x-ray detector[C]. *SPIE*, 2003, **5030**: 694-701.
- [7] SIMONE W, DANIELA C, MARCEL K, *et al.* Comparison of LuYAP, LSO, and BGO as scintillators for high resolution PET detectors[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2003, **50**(5): 1370-1372.
- [8] CRAIG S L. Detector design issues for compact nuclear emission cameras dedicated to breast imaging [J]. *Nuclear Instruments and Methods A*, 2003, **497**(4): 60-74.
- [9] TANG S B, MA Q L, YIN Z J, *et al.* Determination of spatial resolution of plastic scintillation fiber array with a simple method[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2007, **18**(2): 111-114.
- [10] 吴世法. 近代成像技术与图像处理[M]. 2版, 北京: 国防工业出版社, 1997, 35-43.

Cross-talk in Scintillating Fiber Array Detector Irradiated by High-energy X-ray

MA Qing-li¹, TANG Shi-biao², XU Shi-min¹, DANG Shuang-ping¹, ZOU Ji-wei¹

(1 *Electronics Department, Electronic Engineering Institute, Hefei 230038, China*)

(2 *Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: The cross-talk in plastic scintillating fiber array detector with high-energy gamma incident was studied through Monte-Carlo simulation. The relationship between cross-talk and lead layer was also analyzed. Modulate transfer function (MTF), which shows quantity of spatial resolution of imaging detector, was analyzed and compared in order to get the MTF results caused from the difference thickness of lead layer. The results show that there exists severe cross-talk in the detector irradiated by high-energy particles, and the lead layer can reduce the effect. On the other hand, the pixel of detector may become big as the lead layer is introduced, which can reduce the spatial resolution. Through the simulation computation, it is proved that the right thickness of lead layer will reduce cross-talk and increase spatial resolution of imaging detector.

Key words: Scintillating fiber array; Imaging detector; Lead layer; Cross-talk