

文章编号: 0253-2239(2006)09-1429-6

# X 光高分辨探测用 CsI(Tl)晶体的蒙特卡罗模拟研究\*

魏 彪<sup>1</sup> 周 密<sup>2</sup> 冯 鹏<sup>1</sup> 米德伶<sup>1</sup> 谭 怡<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)  
(<sup>2</sup> 重庆工学院数理学院, 重庆 400050)

**摘要:** 提出了一种基于 CsI(Tl)闪烁晶体和面阵 CCD 器件、采用光纤和光纤面板进行光耦合及传输、以扇形束线阵扫描方式实现对 X 光高分辨探测的方案。CsI(Tl)晶体的尺寸大小将直接影响到晶体的发光效率及 X 光的高分辨探测, 据此开展了蒙特卡罗模拟研究。模拟研究了 X 射线能量、X 射线源到探测晶体的距离(源距)、CsI(Tl)晶体的厚度与 X 射线能量分布、全能峰效率与 CsI(Tl)闪烁晶体转换效率之间的关系。结果表明, 当 X 射线能量为 120~450 keV, CsI(Tl)晶体尺寸厚度为 0~1.5 cm 变化时, 全能峰效率的变化范围为 31.34~96.74%, CsI(Tl)闪烁晶体的转换效率的变化范围为 12.8~97.43%。可见, X 射线的能量及 CsI(Tl)闪烁晶体尺寸的厚度, 是决定 X 光高分辨探测的重要参量, 这对优化 X 光高分辨探测用 CsI(Tl)晶体的尺寸设计具有一定的参考价值。

**关键词:** X 射线光学; 工业计算机 X 射线层析术无损检测技术; X 射线高分辨探测; CsI(Tl)闪烁晶体; 蒙特卡罗方法

中图分类号: O799 文献标识码: A

## Study on CsI(Tl) Scintillating Crystal for X-Ray High-Resolution Detection with Monte Carlo Method

Wei Biao<sup>1</sup> Zhou Mi<sup>2</sup> Feng Peng<sup>1</sup> Mi Deling<sup>1</sup> Tan Yi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Opto-Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)  
(<sup>2</sup> College of Mathematics and Physics, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050)

**Abstract:** A X-ray detector, based on the CsI(Tl) scintillating crystal and area-array CCD, using fiber and fiber optic plate to couple and transmit light with fan-beam linear array scanning, has been put forth. The luminescent efficiency and X-ray high-resolution detection are directly influenced by the dimension of CsI(Tl) scintillating crystal, and Monte Carlo method is adopted to simulate the influences, including the relations between the energy of X-ray, the distance between X-ray source and the scintillating crystal, and the thickness of CsI(Tl) crystal and the X-ray energy distribution, and then the whole energy peak efficiency and the transition efficiency. The results show that while the X-ray energy is of 120~450 keV, and the thickness of CsI(Tl) crystal is 0.3~1.5 cm, the whole energy peak is within the range of 31.34%~96.74%, and the transition efficiency is within the range of 12.8%~97.43%. So, the X-ray energy and the dimension of CsI(Tl) scintillating crystal are the most important parameters determining the X-ray high resolution detection. It has certain referenced values to optimize the dimension design of CsI(Tl) scintillating crystal for X-ray high resolution detection.

**Key words:** X-ray optics; industrial X-ray computerized tomography non-destructive testing; X-ray high-resolution detection; CsI(Tl) scintillating crystal; Monte Carlo method

## 1 引 言

X 光在医学领域中的应用已很广泛, 如 X 光拍片, 计算机 X 射线层析术(Computerized tomography, CT)等。X 光在工业领域也有重要的应用, 如 X 射线荧光分析、X 射线衍射分析及计算机 X 射线层析术

等。其中, 工业用计算机 X 射线层析术(Industrial X-ray computerized tomography, X-CT), 因能以图像的形式, 直观、清晰、准确地展示工业零部件的内部结构、材质组成及缺陷状况等信息, 以此进行无损检测与无损评价, 故在航空、航天、军工、机械、电子、石油

\* 国家自然科学基金(60172074)资助课题。

作者简介: 魏 彪(1963~), 男, 浙江桐乡人, 重庆大学教授, 博士后, 主要从事光电检测与成像技术方面的研究。

E-mail: weibiao1963@163.com

收稿日期: 2005-08-15; 收到修改稿日期: 2006-02-05

及地质等部门中有着广泛的用途,被称为最佳的无损检测手段<sup>[1]</sup>。

工业用计算机 X 射线层析术技术的基本原理与医用计算机 X 射线层析术技术相似,均是基于 X 射线与物质相互作用的原理。然而,由于二者检测对象的不同,二者对 X 射线的能量、检测时间及分辨力(空间或密度)等指标要求上,有着较大的差异。这就决定了在工业计算机 X 射线层析术系统中对 X 光的探测有其独特的要求。其中最重要的指标之一是用 X 光进行高空间(或几何)分辨力的探测,以实现工业产品细微缺陷检测的能力,如裂纹、夹杂、空隙等。

目前在工业计算机 X 射线层析术系统中,实现 X 光高分辨探测的方法主要有闪烁晶体加光电倍增管(Photomultiplier tube, PMT)<sup>[2~4]</sup>;闪烁晶体加光电二极管阵列(Photodiode arrays, PDA)<sup>[5,6]</sup>;闪烁屏加图像增强器(Image intensifiers)<sup>[7~10]</sup>;闪烁屏加 CCDs(Charge coupled devices)<sup>[11~13]</sup>;闪烁晶体或屏 + CMOS 图像传感器(CMOS Image sensor)<sup>[14]</sup>等。闪烁体或闪烁屏的作用是将 X 光转换成可见光,利用光电转换器件如光电倍增管或 CCD 等,将光信号转换成易于处理的电信号。闪烁晶体或屏主要是 CsI(Tl)晶体或 CdWO<sub>4</sub>(CWO)晶体等。

提出一种 CsI(Tl)晶体加面阵 CCD 器件,其间采用光纤和光纤面板进行光耦合及传输,以扇形束线阵扫描方式实现对 X 光高分辨探测的方案。CsI(Tl)晶体的尺寸大小,直接影响到 X 光探测的空间分辨力的高低;闪烁晶体的尺寸大小及类型,决定着 X 射线的能量大小(阻止本领)、发光效率等;且为最重要的一点是 CsI(Tl)、CWO 等闪烁晶体,都掺入了对人体有剧毒的杂质 Tl 元素,Cd 本身也含剧毒等情况。针对以上几点开展了利用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)方法的模拟研究工作。研究了不同的晶体类型及尺寸大小与 X 光作用后的发光效率等情况,包括 X 射线能量、X 射线源到探测器的距离(源距)、CsI(Tl)闪烁体的厚度与 X 射线能量分布、全能峰效率与 CsI(Tl)闪烁体转换效率等等,获得了一些有意义的结果。

## 2 X 光高分辨探测原理

一束 X 射线穿过物质并与物质相互作用后,X 射线强度将受到射线路径上物质的吸收或散射而衰减,衰减规律由比尔定律确定。考虑一般性,设物质系非

均匀的,一个面上衰减系数分布为  $\mu(x,y)$ 。当 X 射线穿过该物质面,入射强度  $I_0$  的 X 射线经衰减后以强度  $I$  穿出,射线在面内的路径长度为  $L$ ,如图 1。

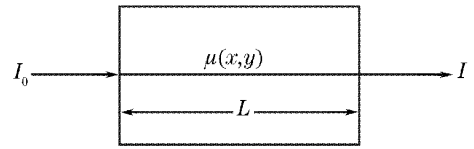


图 1 X 射线穿过衰减系数为  $\mu(x,y)$  的物质面  
Fig. 1 Penetration of X-ray through material surfaces with attenuation index of  $\mu(x,y)$

由比尔定律确定的  $I_0$ 、 $I$  及  $\mu(x,y)$  的关系如下:

$$I = I_0 \exp \left[ - \int_L \mu(x,y) dx dy \right], \quad (1)$$

由(1)式可得

$$\int_L \mu(x,y) dx dy = \ln \frac{I_0}{I}, \quad (2)$$

可见,在工业计算机 X 射线层析术系统中,探测器的作用是测量 X 射线与物质作用前、后的射线强度  $I_0$  和  $I$ ,由此便可求得衰减或吸收系数  $\mu$ ,计算机 X 射线层析术成像就是将不同的  $\mu$  值赋予图象上不同的灰度值。

由图 1 可见,X 光路径上  $\mu(x,y)$  的物质面越小,就越有可能检测出细微缺陷的分辨能力,这就要求探测 X 光的闪烁晶体,须有足够小的尺寸。小尺寸的晶体,虽可提高空间分辨力,但带来发光效率低的新问题。况且,CsI(Tl)闪烁晶体掺入了对人体有剧毒的杂质 Tl 元素,既要能确保 X 光的高分辨探测,又要能产生足够高的光量子效率,采用蒙特卡罗模拟研究 CsI(Tl)晶体不同尺寸的发光效率,是解决问题的一个可选的方案。

## 3 计算模型

X 射线能量一般在 450 keV 以内 ( $E < 0.5$  MeV)。因此,CsI(Tl)闪烁晶体计算模型的建立主要基于 X 射线与物质相互作用的两种机理,即光电效应和康普顿散射。

### 3.1 光电效应模型建立

为便于建立模型,讨论无任何内部界面的 CsI(Tl)晶体中荧光透过的效率。只要得到 CsI(Tl)晶体连续层的荧光透过率,便可将结果推广到理想晶柱层和实际的 CsI(Tl)晶层。图 2 为 CsI(Tl)晶体连续层中荧光透过率示意图。根据荧光透过 CsI

(Tl)层时出射方向与入射 X 射线之间夹角的关系，可将工作模式分为反射方式和透射方式两种，如

图 2(a)、图 2(b)所示。

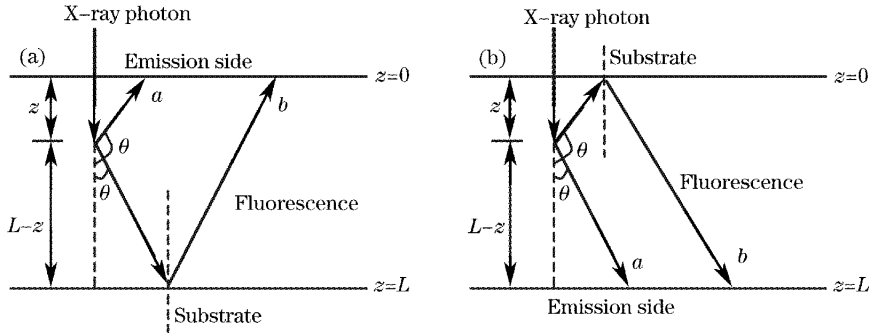


图 2 CsI(Tl)晶体连续层中荧光透射率示意图。(a)反射模型 (b)透射模型

Fig.2 Sketch of fluorescence transmissivity of CsI(Tl) continuous layer. (a) Reflection model, (b) transmission model

假设能量为  $E$  的 X 光子垂直入射厚度为  $L$  的 CsI(Tl)层,在不同深度  $z$  处  $z \sim dz$  范围内被吸收的概率与  $z$  有关。由于主要是通过光电效应吸收能量,根据 X 射线在物质中的指数衰减特性,该概率可表示为

$$f_z(E, z) dz = \frac{\mu_{pe}(E) \exp[-\mu_T(E)z] dz}{\{1 - \exp[-\mu_T(E)L]\} \mu_{pe}(E) / \mu_T(E)}, \quad (3)$$

$0 \leq z \leq L$

(3)式的分母为一归一化因子。CsI(Tl)晶体吸收 X 射线能量后,可激发各向同性发射的荧光光子,沿  $\theta$  方向发射的概率以 X 射线入射方向为轴旋转对称,荧光进入  $\theta \sim \theta + d\theta$  对应的空心圆锥立体角微元  $d\Omega$  的概率为

$$f_\theta(\theta) d\theta = \frac{1}{4\pi} d\Omega = \frac{1}{2} \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

$0 \leq \theta \leq \pi$

其中  $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ 。在反射方式和透射方式两种工作模式中,荧光在 CsI(Tl)连续层中传播时有两种可能途径,直接透过 CsI(Tl)层出射,如  $a$  光线;经过衬底反射后透过 CsI(Tl)层出射,如  $b$  光线。设 CsI(Tl)对荧光的(线性)吸收系数为  $\sigma$ ,假定衬底的反射为镜面反射,忽略反射率与入射角的关系,在深度  $z$  处产生的以  $\theta$  角发射的荧光透过 CsI(Tl)的概率随传输距离指数递减,由图 2 即可得该概率为

反射方式:

$$f_R(z, \theta) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{z}{|\cos \theta|} \sigma\right], & \pi/2 \leq \theta \leq \pi, \text{ 如 } a \text{ 光线} \\ \exp\left[-\frac{2L-z}{|\cos \theta|} \sigma\right] R_s, & 0 \leq \theta \leq \pi/2, \text{ 如 } b \text{ 光线} \end{cases} \quad (5)$$

透射方式:

$$f_T(z, \theta) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{L-z}{\cos \theta} \sigma\right], & 0 \leq \theta \leq \pi/2, \text{ 如 } a \text{ 光线} \\ \exp\left[-\frac{L+z}{|\cos \theta|} \sigma\right] R_s, & \pi/2 \leq \theta \leq \pi, \text{ 如 } b \text{ 光线} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $R_s$  为衬底反射率。上式忽略了逸出界面对荧光的反射。这是因为,如果考虑逸出界面的反射,反射光还会发生反射和折射,模型的复杂程度将大幅度增加;从工艺上考虑,可以在逸出界面上制作增透膜以减小反射,故暂且忽略逸出界面的反射。由(3)式~(6)式可求出能量为  $E$  的 X 射线光子,在 CsI(Tl)晶体中激发荧光时,荧光透过 CsI(Tl)层的(平均)概率为

$$P(E, L, \sigma, R_s) = \int_0^L f_z(E, z) dz \int_0^\pi f_\theta(\theta) f_{T,R}(z, \theta) d\theta, \quad (7)$$

其中  $f_{T,R}(z, \theta)$  代表  $f_T(z, \theta)$  或  $f_R(z, \theta)$ 。上式表明,荧光透过率是 X 光子能量  $E$ 、CsI(Tl)层厚度  $L$ 、荧光吸收系数  $\sigma$ 、衬底反射系数  $R_s$  的函数。这就是 X 光转换屏 CsI(Tl)晶体的点扩散函数<sup>[15]</sup>,对此函数做傅里叶变换即可得到转换屏的调制传递函数 MTF- $F(P)$ 。可见,CsI(Tl)晶体的尺寸,将影响对 X 光的探测效率。

### 3.2 康普顿散射模型建立

当 X 光子能量较高时,康普顿散射是 X 射线在其中损失能量的主要机理<sup>[16~18]</sup>。鉴于散射级数越多,光子能量越低,射程越短,影响也相对较小,故模型的建立只考虑一级散射,既可简化计算,又能反映问题的实质,如图 3 所示。

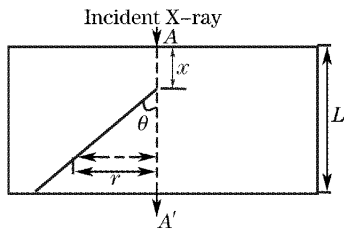


图 3 康普顿散射模拟计算示意图

Fig. 3 Sketch of simulation calculation of Compton scattering

由图 3 可见,只要知道屏内某一距离上康普顿电子数和它的射程,就可以求得转换屏内康普顿散射沉积能量的分布。设入射到转换屏内的一束无限细的 X 射线 AA', 具有的光子数为  $N_i$ , 则传播到屏内  $z$  处的康普顿电子数为

$$N_e(z) = N_i[1 - \exp(-\mu\rho z)], \quad (8)$$

式中  $\mu$  是屏对 X 光子的质量吸收系数,  $\rho$  是屏的密度。因为散射电子的能量和散射截面都是散射角的函数, 因此康普顿电子沉积下来的能量角分布为

$$E_e(\theta) = N_i[1 - \exp(-\mu\rho z)] \frac{d\sigma_c}{d\theta} E_{ce}, \quad (9)$$

散射角  $\theta$  越大, 散射截面  $d\sigma_c/d\theta$  越小, 散射电子能量也就越低。因此, 康普顿散射所沉积下来的能量大部分集中在较小的角度内。另外, 由于康普顿电子以一定散射角穿行物质, 损耗的能量弥散在以 AA' 为轴的一

个圆柱体内, 电子能量高散射角小, 弥散小。而散射角大的电子能量低, 射程短, 这也有利于能量集中。

屏内  $z$  处的康普顿电子沿  $\theta$  方向, 在屏出射表面距离 AA' 轴  $r$  处沉积的能量为

$$E_e(r) = N_i[1 - \exp(-\mu\rho z)] \frac{d\sigma_c}{d\theta} E_{ce} \times \exp\left(-\frac{r\rho}{R \sin \theta}\right), \quad (10)$$

式中  $R$  是康普顿电子的射程, 它与康普顿电子能量的关系为

$$R = 0.524 E_{ce} - 0.133, \quad (E_{ce} \geq 0.8 \text{ MeV}) \quad (11)$$

$$R = 0.407 (E_{ce})^{1.38}, \quad (0.15 \text{ MeV} \leq E_{ce} \leq 0.8 \text{ MeV}) \quad (12)$$

由(10)式对整个屏厚及康普顿电子前向散射角的积分求得康普顿电子在屏出射表面上的沉积能量分布:

$$E'_e(r) = \int_0^L \int_0^\pi N_i[1 - \exp(-\mu\rho z)] \frac{d\sigma_c}{d\theta} E_{ce} \times \exp\left(-\frac{r\rho}{R \sin \theta}\right) \frac{1}{R \sin \theta} d\theta dz, \quad (13)$$

式中  $L$  是转换屏的厚度。考虑到旋转对称性, 模型简化为二维情况。上式的傅里叶变换即为转换屏的调制传递函数  $MTF-F[E'_e(r)]$ 。可见, CsI(Tl) 晶

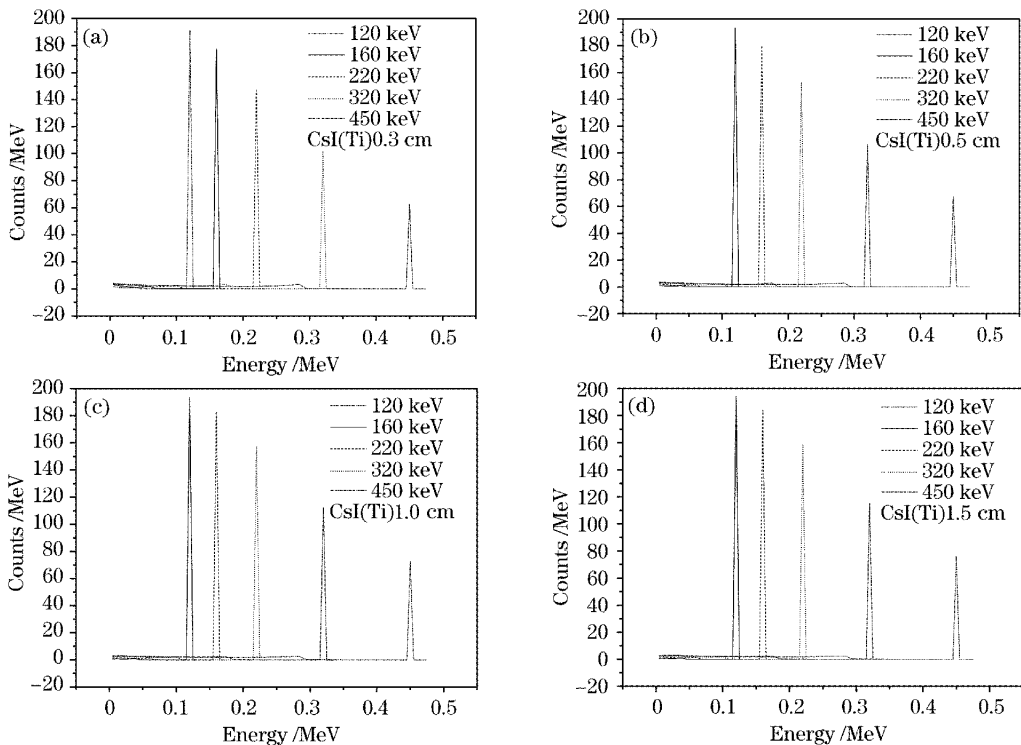


图 4 不同长度的 CsI(Tl) 晶体在不同能量 X 射线作用下的能量分布

Fig. 4 Energy distribution of different energies X-ray through the CsI(Tl) of different lengths

体的尺寸,将影响对 X 光的高分辨探测。

### 4 蒙特卡罗模拟研究结果

#### 4.1 能量分布的模拟结果

由于入射粒子与物质的微观相互作用是随机的,因而其能量损失是一随机过程。贝特(Bethe)公式只是此过程的平均值的描述。实际上,同样能量的入射粒子经过一定距离后,各个粒子损失的能量不会是完全相同的。因此,单能粒子穿过一定厚度的物质后,将不再是单能的,而是发生了能量离散—称作“能量歧离”。离散后的粒子能量分布的宽度可作为“能量歧离”的量度。它随粒子径迹行进的距离

而改变,如图 4 所示。

#### 4.2 全能峰效率的模拟结果

模拟结果如图 5 所示。可见,随着 X 射线能量的升高,探测器 CsI(Tl)晶体的全能峰效率迅速下降;但在入射能量相同的条件下,随着晶体的长度增加全能峰效率有所提高。全能峰效率下降就会带来能量分辨变差。

#### 4.3 CsI(Tl)闪烁体转换效率的模拟结果

模拟结果如图 6 所示。可见,随着能量的增加,闪烁体转换效率逐渐降低;在相同能量条件下,闪烁体的长度越大,闪烁体转换效率迅速升高。

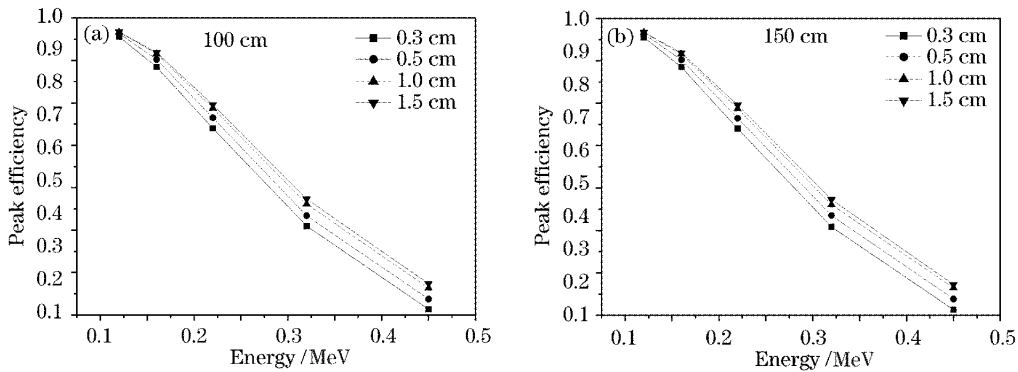


图 5 CsI(Tl)晶体在不同源距下全能峰效率比较

Fig. 5 Comparison individual peak efficiency to CsI(Tl) detector with different distance of radial source from detector

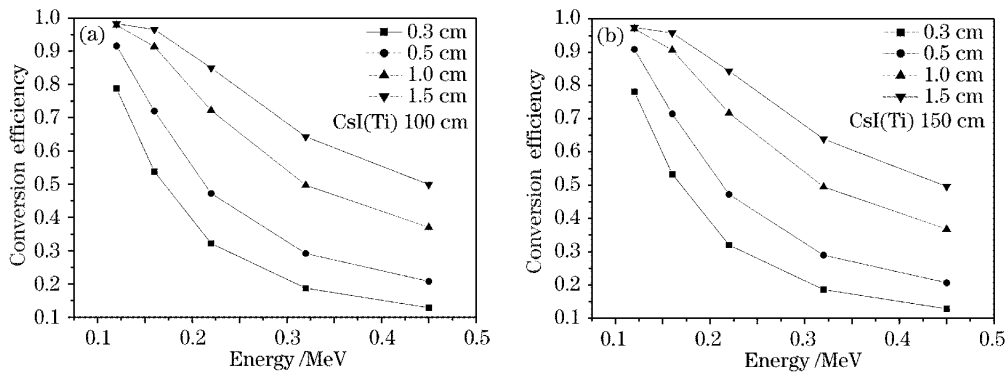


图 6 CsI(Tl)探测器的转换效率

Fig. 6 Conversion efficiency of CsI(Tl) detector

### 5 实验结果

限于实验室条件,仅对 CsI(Tl)闪烁体转换效率的蒙特卡罗模拟结果开展了实验验证工作。实验结果用 X 光图像上的像素值和信噪比( $R_{SN}$ )来描述。在 X 射线能量为 120 keV 条件下,CsI(Tl)闪烁体长度为 0.5 cm 时,X 光图像像素值的平均值为 1109,最小值为 817,最大值为 1336,均方根值

(RMS)为 107,信噪比为 10.3;而当 CsI(Tl)闪烁体长度为 1.0 cm 时,X 光图像像素值的平均值为 2039,最小值为 1516,最大值为 2367,均方根值为 40.7,信噪比为 50。实验结果表明,因 CsI(Tl)闪烁体的长度不同带来了闪烁体转换效率的不同,从而在 X 光图像上表现为 S/N 的差别,且差异明显。CsI(Tl)闪烁体长度由 0.5 cm 增大到 1.0 cm 时,X 光图像上的信噪比则由 10.3 提高到 50,几乎提高

了5倍。这就实验证明了上述蒙特卡罗模拟结果的正确性,即在X光的相同能量条件下,闪烁体的长度越大,闪烁体转换效率迅速升高。

## 6 结 论

本文提出了一种基于CsI(Tl)闪烁晶体和面阵CCD器件、采用光纤和光纤面板进行光耦合及传输、以扇形束线阵扫描方式实现对X光高分辨探测的新方案。针对CsI(Tl)晶体的尺寸大小将直接影响到晶体的发光效率及X光的高分辨探测,通过蒙特卡罗模拟研究结果及部分实验结果,可以得到如下初步结论:

1)在X射线源的能量小于450 keV范围内,X射线源到CsI(Tl)探测晶体的距离(1.5 m以内)对探测器性能的影响不大,为此依据被测试件的大小,可以适当改变X射线源到探测器之间的距离。

2)当X射线能量分别为120 keV、160 keV、220 keV、320 keV时,无论晶体长度(1.5 cm内)为多少,探测晶体的全能峰效率均大于40%;且若圆柱形晶体的直径不变,晶体的厚度(1.5 cm内)越大,全能峰效率和转换效率就越高,表明CsI(Tl)晶体尺寸较小时,将降低探测效率。

3)X射线能量和CsI(Tl)晶体厚度,是决定X射线探测器性能的重要参量,通过蒙特卡罗模拟结果,可以优化X光高分辨探测用闪烁晶体的尺寸设计。

## 参 考 文 献

- 1 Translated by Society of Chinese Non-Destructive Testing. *The Books of America Non-Destructive Testing (Volume Ray)* [M]. Edited by Society of America Non-Destructive Testing, Shanghai: The World Book Press, 2000. 618~653 (in Chinese); 美国无损检测手册(射线卷)[M]. 美国无损检测学会编,中国无损检测学会翻译,上海:世界图书出版社,2000. 618~653
- 2 K. A. Spencer. Computer tomography — An overview[J]. *Photographic Science*, 1989, **37**(2): 84~89
- 3 W. B. Gilboy. X-and  $\gamma$ -ray tomography in NDE applications[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1984, **A221**: 193~200
- 4 T. Lüthi, A. Flisch, P. Wyss. Industrial computed X-ray tomography[J]. *NDT International*, 1998, **40**(3): 196~197
- 5 M. S. Rapaport, A. Gayer, E. Iszak *et al.*. A dual-mode industrial CT[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1995, **A352**: 652~658
- 6 P. Rueggsegger, B. Koller, R. Muller. A microtomographic system for the non-destructive evaluation of bone architecture [J]. *Calcified Tissue Int.*, 1996, **58**(1): 24~29
- 7 Roy Clarke. CCD X-ray detectors: opportunities and challenges [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1994, **A347**: 529~533
- 8 A. Owens, Kieran J. McCarehy. Energy deposition in X-ray CCDs and charged particle discrimination [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1995, **A366**: 148~154
- 9 Tetsuhiko Takhoshi, Haruo Iton, Toshikazu Shimado *et al.*. Design of integrated radiation detectors with a-Si photodiodes on ceramic scintillators for use in X-ray CT[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1990, **37**(3): 1478~1503
- 10 K. Machin, S. Webb. Cone-beam X-ray microtomography of small samples[J]. *Phys. Med. Biol.*, 1994, **39**(7): 1639~1657
- 11 Charles R. Smith, Toseph W. Erker. Low cost, high resolution X-ray detector system for digital radiography and computed tomography[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **2009**: 31~35
- 12 M. Lovea, G. H. Georgescu, C. Rizescu *et al.*. Some aspects concerning the 2-D and 3-D computerized tomography applied in non-destructive testing[J]. *NDT. Net*, 1999, **4**(7): 5~15
- 13 S. Nuzzo, F. Peyrin, E. Martin *et al.*. Assessment of bone mineral content from 3-D synchrotron radiation microtomography images[J]. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 2001, **48**(3): 859~863
- 14 Seung Wook Lee, Ho Kyung Kim, Gyuseong Cho. A 3-D X-ray microtomographic system with a CMOS image sensor[J]. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 2001, **48**(4): 1503~1505
- 15 Shao Junming, Lu Hongnian, Cai Hui. A piont spread function model for X-ray imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1148~1152 (in Chinese)  
邵军明,路宏年,蔡慧. X射线成像的一种点扩展函数模型[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1148~1152
- 16 Wang Jianguang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte Carlo method for research on imaging of inhomogeneity in the scattering medium[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(2): 169~172 (in Chinese)  
王建岗,王桂英,徐至展. 用蒙特卡罗法研究高散射介质中的成像[J]. 中国激光, 2001, **A28**(2): 169~172
- 17 Wang Lei, Zhang Xinfeng, Gao Jiansong *et al.*. The imiging and application of optical interference[J]. *China Laser Med. Surg.*, 2000, **9**(3): 197 (in Chinese)  
王磊,张新峰,高涌松等. 光学相干CT成像及应用[J]. 中国激光医学杂志, 2000, **9**(3): 197
- 18 Mei Lin, Wu Lide, Wang Yuwen. A novel defect evaluation method in infrared NDT based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1452~1456 (in Chinese)  
梅林,吴立德,王裕文. 一种给予遗传算法的红外无损检测缺陷的新方法[J]. 光学学报, 2002, **22**(12): 1452~1456