

狭长 CsI(Tl) 闪烁体发光效率的研究*

魏 彪¹ 周 密² 靳冬欢¹ 冯 鹏¹ 米德伶¹

(1 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2 重庆工学院物理系, 重庆 400039)

摘 要 提出了基于狭长 CsI(Tl) 闪烁体和面阵 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 射线探测与成像的工业 X-CT 系统探测器方案. 基于此, 通过物理分析及数学建模, 利用 Matlab 模拟研究了 X 光能量小于 450 keV 时狭长 CsI(Tl) 闪烁体的发光效率等性能指标. 研究表明: 当光电吸收截面 μ_{ph} 和康普顿吸收截面 μ_c 分别为 0.000313 和 0.0000295、反射层反射系数 R 和衬底反射系数 R_s 分别取 0.95 和 0.8、荧光线性吸收系数 σ 取 $0.000222 \mu\text{m}^{-1}$ 时, 得到狭长 CsI(Tl) 闪烁晶体的长度 l 、高度 h 和宽度 w 取值范围分别是 $926 \sim 4512 \mu\text{m}$ 、 $242 \sim 5000 \mu\text{m}$ 和 $242 \sim 5000 \mu\text{m}$ 的结论. 在此范围内, 既可使闪烁晶体有较好的空间分辨率又可获得最高的发光效率.

关键词 X 光; 工业 X-CT; CsI(Tl) 晶体; 发光效率; Matlab

中图分类号 O799 **文献标识码** A

0 引言

X 光, 即 X 射线. 工业 X-CT(X-ray Computed Tomography) 系统中的 X 射线探测器可以有多种结构形式^[1~13]. 本论文研究的 X 射线探测器, 其结构形式主要由 CsI(Tl) 闪烁体和面阵 CCD(Charge Coupled Device) 器件所构成. 它对 X 光的探测原理是: 产生于 X 射线管的 X 射线(能量一般小于 450 keV) 与 CsI(Tl) 晶体相互作用; CsI(Tl) 闪烁体将 X 射线转换成可见光; 可见光经光纤传输、由光纤面板进行光耦合至面阵 CCD; 面阵 CCD 经光电转换后, 将可见光转换成电信号; 最后, 由有关电子学线路进行信号的获取与处理.

可见, 影响 X 射线探测效率最直接的因素是 CsI(Tl) 闪烁体的性能及其尺寸大小, 此直接决定了 X 射线与之作用后的发光效率; CsI(Tl) 闪烁体的发光效率也将直接影响到光纤的传光效率和光纤面板的耦合效率以及 CCD 器件的光电转换效率, 进而影响到工业 X-CT 系统的图像质量. 因此, 研究 CsI(Tl) 闪烁体的发光效率具有重要的实际意义.

在工业 X-CT 系统中, 为了使 X 射线探测器有足够的能量沉积, 让更多的 X 射线转换成可见光, 又要让 CT 系统获得高的空间(或几何)分辨率, 通常将 CsI(Tl) 闪烁体做成狭长的长方体, 即闪烁体的长度与其横截面短边长度之比要足够大. 此时, CsI(Tl) 闪烁体的发光效率问题, 直接影响到系统的

性能指标. 而 CsI(Tl) 闪烁体掺入了对人体有剧毒的杂质 Tl 元素, 故模拟研究 CsI(Tl) 不同尺寸下的发光效率是解决问题的一个可选的方案.

1 计算模型

模型所考虑的 X 射线能量一般在 450 keV 以内($E < 0.5 \text{ MeV}$), 故狭长 CsI(Tl) 闪烁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^[14].

1.1 闪烁体模型

CsI(Tl) 闪烁体模型为狭长长方体形状, 长为 l , 宽为 w , 高为 h , 如图 1.

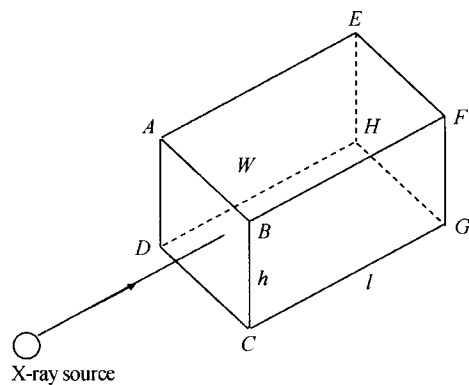


图 1 闪烁体模型

Fig. 1 Scintillation crystal model

在模型中, X 射线从面 ABCD 一侧入射, 并与晶体发生作用(光电效应和康普顿散射), 从面 EFGH 一侧出射, 出射时为可见光, CsI(Tl) 闪烁体实现了由 X 射线到可见光的转换过程.

为便于研究, 假定 X 射线源为点源, CsI(Tl) 闪烁体是连续均匀的, 这样它对 X 射线的光电吸收截面

*国家自然科学基金资助项目(批准号: 60172074)

Tel: 023-65102515 Email: weibiaol963@163.com

收稿日期: 2004-10-25

μ_{ph} 和康普顿吸收截面 μ_c 均是一个常量. 同时, 还假定光电效应和康普顿散射两种作用是互相独立的.

1.2 光电效应模型

此时不考虑康普顿散射的影响, 故模型中的反射是镜面反射, 忽略反射系数与入射角的关系, 也忽略逸出界面对荧光的反射.

由于 X 射线在狭长 CsI(Tl) 闪烁体内发光并进行传播的复杂性, 为此对闪烁体在长度和高度(或宽度)方向上分别建立模型, 尔后按照一定的方法合成, 并加以修正, 以便建立的模型更接近于实际情况.

1.2.1 基于长度方向的模型

因不考虑宽度、高度的大小, 故闪烁体基于长度方向的尺寸是无限大的, 如图 2.

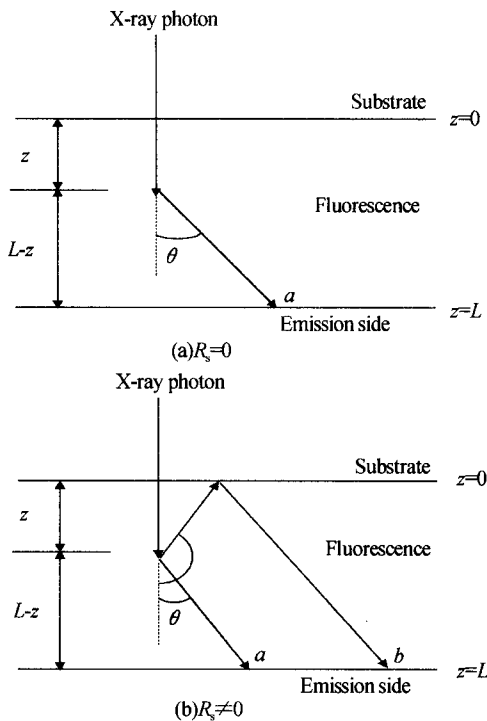


图 2 闪烁体长度方向上的模型
Fig. 2 Scintillation crystal model along the longness orientation

X 射线在 CsI(Tl) 闪烁体中转换为可见光, 光在闪烁体中传播时有两种可能途径: 直接透过 CsI(Tl) 晶体层出射, 如 a 光线; 经衬底反射后透过 CsI(Tl) 晶体层出射, 如 b 光线. 能量为 1 个单位的 X 射线光子, 在 CsI(Tl) 激发荧光时, 透过 CsI(Tl) 晶体层的能量为^[15]

不考虑衬底反射 ($R_s = 0$) 时

$$C_1 = \frac{1}{2} \int_0^L \mu_{ph} e^{-\mu_{ph} z} dz \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta e^{-\frac{L-z}{\cos \theta} \sigma} d\theta \quad (1)$$

考虑衬底反射 ($R_s \neq 0$) 时

$$C_2 = \frac{1}{2} \int_0^L \mu_{ph} e^{-\mu_{ph} z} dz \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta e^{-\frac{L-z}{\cos \theta} \sigma} R_s d\theta \quad (2)$$

式中, C_1 、 C_2 为闪烁体 CsI(Tl) 的发光效率, μ_{ph} 为 X

射线与晶体相互作用时的光电吸收截面, σ 为 CsI(Tl) 对荧光线性吸收系数, R_s 为衬底反射系数.

1.2.2 基于高度方向的模型

假定衬底反射系数 $R_s = 0$, 与衬底和逸出面垂直的两个面的反射系数为 R . 该模型在宽度方向上是无限的, 见图 3.

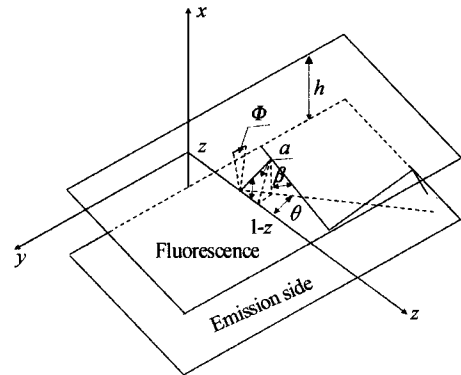


图 3 闪烁体高度方向上的模型
Fig. 3 Scintillation crystal model along the height orientation

能量为 1 个单位的 X 射线光子, 在 CsI(Tl) 中激发出荧光, 透过 CsI(Tl) 晶体层的能量为^[15]

$$C_3 = \frac{1}{4\pi} \int_0^L \mu_{ph} e^{-\mu_{ph} z} dz \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha \cdot e^{-\frac{L-z}{\cos \alpha} \sigma} R^{\lceil \frac{L-z}{\cos \alpha} \rceil} d\alpha \quad (3)$$

式中, C_3 为闪烁体 CsI(Tl) 的发光效率, R 为闪烁体封装时四周所填充的反射层的反射系数.

1.2.3 模型的修正

实际上, 在宽度方向和高度方向上, 光子的传输特性是一样的, 由此所建立数学模型时的算法也是一样的, 故宽度方向上的模型和计算, 可参考高度方向的模型和计算.

对于长度方向上的模型: 不考虑衬底反射 ($R_s = 0$), 发光效率为 C_1 ; 考虑衬底反射 ($R_s \neq 0$), 发光效率为 C_2 ;

对于高度方向上的模型: 不考虑衬底反射时, 发光效率为 C_3 ; 考虑衬底反射时, 发光效率为 C_4 .

这里, 可认为长度方向上衬底反射对发光效率的影响等于高度方向上衬底反射对发光效率的影响, 即

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_3}{C_4}, \text{ 则 } C_4 = \frac{C_2}{C_1} C_3$$

考虑高度与不考虑高度相比, 发光效率变化了 q 倍, 则

$$q = \frac{C_4}{C_2} = \frac{C_2 C_3}{C_1 C_2} = \frac{C_3}{C_1}$$

鉴于宽度方向上的模型及计算, 是和高度方向

上的模型及计算同理的,考虑宽度与不考虑宽度相比,发光效率同样变化了 q 倍.

因此,对于狭长 CsI(Tl)闪烁体的长方体模型,在同时考虑长度、高度、宽度的情况下,总的发光效率为

$$C_{\text{ph}} = \left(\frac{C_3}{C_1}\right)^2 C_2 \quad (4)$$

式中, C_{ph} 为考虑光电效应的前提下,狭长闪烁体模型的发光效率.

1.3 康普顿散射模型

能量为 E 的 X 射线,垂直入射厚度为 l 的 CsI(Tl) 晶体层,在不同深度 z 处,即 $z \sim z + dz$ 范围内被吸收的概率与 z 有关,根据 X 射线在物质中的指数衰减特性,其作用概率可表示为

$$f_z(z) dz = d(1 - e^{-\mu_c z}) = \mu_c e^{-\mu_c z} dz \quad (5)$$

式中, μ_c 为 X 射线与物质相互作用时的康普顿散射的吸收截面.

发生康普顿散射与发生光电效应相比,除了 X 射线与晶体物质相互作用时的吸收截面不同外,同样会产生各向同性发射的可见光,其光的波长主要与 CsI(Tl) 闪烁体本身有关,故它的计算和分析与光电效应是一样的,这里不再赘述.

1.4 模型的合成

上述模型的建立,是假定 X 射线与 CsI(Tl) 闪烁晶体发生光电效应和康普顿散射两种作用是互相独立的,但是实际上这两种作用是同时发生的,故同时考虑两种效应时

$$\mu = \mu_{\text{ph}} + \mu_c \quad (6)$$

式中, μ_{ph} 为 X 射线与晶体相互作用时的光电吸收截面; μ_c 为 X 射线与物质相互作用时的康普顿散射的吸收截面; μ 为同时考虑两种效应的情况下,狭长 CsI(Tl) 闪烁体对 X 射线的吸收截面,相应的发光效率用 C 表示; C 的分析计算可参考闪烁体的光电效应模型.

2 模拟结果及讨论

模拟采用 Matlab 软件^[16]. CsI 密度为 $\rho = 4.51 \text{ g/cm}^3$, 因 CsI(Tl) 中所含激活剂 Tl_1 极少,对密度基本没有影响,故用 CsI 的密度代替 CsI(Tl) 的密度.

当 X 射线能量为 140 keV 时, $\mu_{\text{ph}}/\rho = 0.6951 \text{ cm}^2 \times \text{g}^{-1}$, $\mu_c/\rho = 0.06546 \text{ cm}^2 \times \text{g}^{-1}$, 则 $\mu_{\text{ph}} = 3.13 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{m}^{-1}$, $\mu_c = 0.295 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{m}^{-1}$.

σ 为闪烁体对荧光的吸收系数, $1/\sigma$ 可理解为荧光光子的“自由程”, $1/(\sigma_1)$ 可认为是自由程与长度的比值,无单位,以该参量代替 σ 研究发光效率. 可

见,对发光效率有重要意义的不是 σ 或 1 单个参量,而是二者乘积的倒数.

2.1 闪烁体高度及宽度的确定

$R \neq 1$ 时,发光效率 C 与闪烁体高度 h 的是有密切关系的. 图 4 给出了在 R 分别等于 0.65、0.75、0.85、0.95 时的发光效率 C 与闪烁体高度 h 的关系,图中的曲线都是单调递增的,其中 X 光子能量 $E = 140 \text{ keV}$, 闪烁体长度 $l = 2000 \text{ } \mu\text{m}$, $\sigma = 0.000222 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$, $R_s = 0.8$. 在 h 较小时,发光效率 C 上升较快;在 h 较大时,发光效率 C 变化较小,几乎趋于定值.

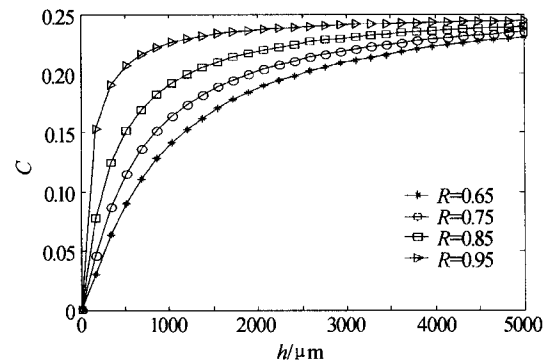


图 4 发光效率 C 与闪烁体高度 h 的关系

Fig. 4 Efficiency vs height of scintillation crystal

初定 h 的范围是 $0 \sim 5000 \text{ } \mu\text{m}$, 因为在这个范围内,发光效率可从 0 趋于某一定值; h 太大时,对提高空间分辨率是非常有害的. 比较一下 R 分别等于 0.65、0.75、0.85、0.95 时的四条曲线, R 的值越大,上升时间越短,发光效率也越高、越能够较快的趋于定值. 那么,闪烁体高度 h 在同样的条件下,取值的空间就更大一些. 另外,闪烁体的高度直接影响分辨率,故不希望闪烁体的高度值太大. 同时考虑到 MgO 反射层在加工、安装较理想的情况下,是可以达到 0.95 的反射系数的. 所以,计算分析时取反射系数 $R = 0.95$.

鉴于闪烁体的宽度和高度对发光效率的影响是等效的,所以对闪烁体高度的模拟结果同样适用于对闪烁体宽度的模拟,故闪烁体的宽度取值 $242 \sim 5000 \text{ } \mu\text{m}$.

2.2 闪烁体长度的确定

发光效率 C 与 R_s 、 l 是有密切关系的. X 光子能量 $E = 140 \text{ keV}$, $R = 0.95$, $\sigma = 0.000222 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ 时发光效率 C 与 R_s 、 l 的关系如图 5. 图 5(a) 中,闪烁体高度 $h = 242 \text{ } \mu\text{m}$; 图 5(b) 中闪烁体高度 $h = 5000 \text{ } \mu\text{m}$. 二者相比较,闪烁体高度对发光效率有一定影响,但在 $h \geq 242 \text{ } \mu\text{m}$, 即使 h 值相差悬殊,对发光效率的影响并不太大,这也就验证了前述关于 h 取值范围的讨论.

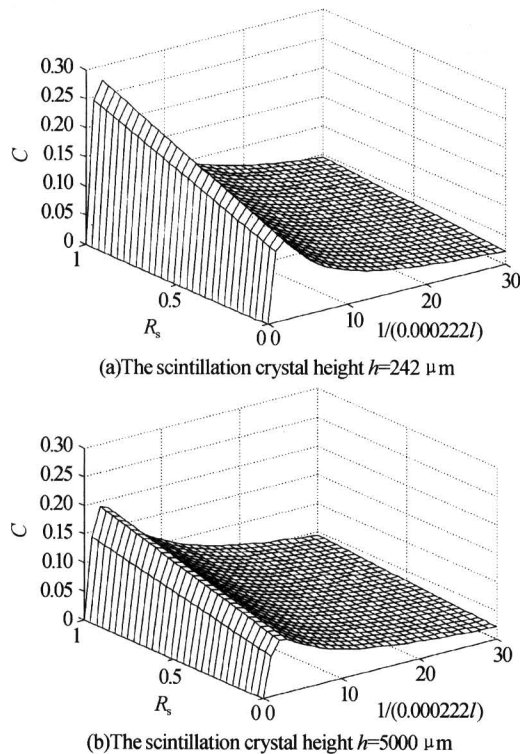


图5 发光效率 C 与 R_s, l 的关系

Fig. 5 Luminescence efficiency C vs R_s and l

发光效率 C 与闪烁体长度 l 的关系至关重要. $1/(0.000222l)$ 为 $0 \sim 10$ 之间时, 发光效率的变化是比较强烈的. $1/(0.000222l)$ 大于 30 时, 发光效率的变化平缓, 并趋于一个稳定值. 对于不同 R_s 值, 这种变化基本相同. 在某个 CsI(Tl) 长度下, 发光效率会趋于最大, 这主要是由于 CsI(Tl) 长度增大时, X 光子被吸收的概率增加, 但 $1/(\sigma_1)$ 减小, 引起荧光透过率降低, 相互作用的结果使发光效率有一个最大值. 同时, 这也表明增加 CsI(Tl) 长度, 发光效率不一定增大, 应综合考虑荧光透过率降低的负面影响. 易见, 如果 σ 减小, 发光效率峰值将向长度增加的方向移动; 在 $\sigma=0$ 的极限条件下, 发光效率随长度增加而趋于一稳定值, 不出现峰值.

由图 5 的模拟结果还可知, 不同的 R_s 值对曲线的变化趋势是基本没有影响的, 故计算分析时选取常用值 $R_s=0.8$, 而闪烁体高度 h 的影响则是需要考虑的.

此外, 通过无条件优化, 求得 $R_s=0.8$, h 分别等于 $242 \mu\text{m}$ 和 $5000 \mu\text{m}$ 时的发光效率的最大值, 选取发光效率上升到最大值的 0.707 倍时做为一个阈值点, 再求得阈值点时的闪烁体长度值, 然后对上述两个取值范围取交集, 从而可以确定闪烁体长度的取值范围是 $926 \sim 4512 \mu\text{m}$, 在此范围内, 狭长闪烁晶体 CsI(Tl) 的发光效率 C 较高.

3 模拟结果的验证

图 6 给出了发光效率 C 与闪烁体长度 l 、闪烁体高度 h 的关系. 其中, X 光子能量 $E=140 \text{ keV}$, $R=0.95$, $R_s=0.8$, $\sigma=0.000222 \mu\text{m}^{-1}$.

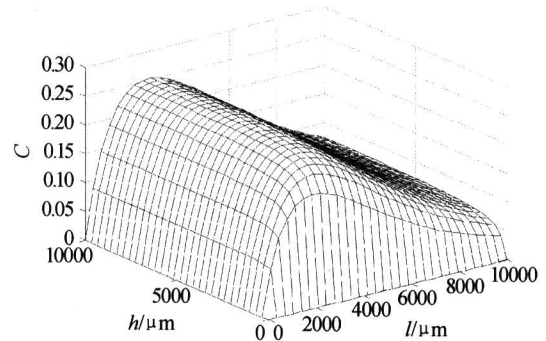


图6 发光效率 C 与闪烁体长度 l 、闪烁体高度 h 的关系
Fig. 6 Luminescence efficiency vs scintillation crystal length and height (C vs l and h)

为便于比较, 设定 l 的范围为 $0 \sim 10000 \mu\text{m}$, h 的范围也为 $0 \sim 10000 \mu\text{m}$. 从图 6 中可以看出, 将 l 视为定值来分析 h 的方法是合理的, 因为不同的 l 值, 对 h 的变化趋势是基本没有影响的; 而不同的 h 值, 对 l 的变化趋势的影响也是很小的. 对于所确定的闪烁体高度 h 的取值范围 $242 \sim 5000 \mu\text{m}$, 闪烁体长度 l 的范围 $926 \sim 4512 \mu\text{m}$, 其发光效率是最高的, 从而验证了上述所得到的模拟结果.

4 结论

1) 所建立的模型为理想的 CsI(Tl) 狭长晶柱, CsI(Tl) 晶体对荧光的衰减作用以吸收系数 $\sigma=0.000222$ 进行表征, 且综合考虑了光电效应和康普顿散射.

2) CsI(Tl) 狭长晶体, 存在一个可使发光效率达到最大的晶体长度, 这主要是由于 CsI(Tl) 晶体长度增大时, X 光子被吸收的概率增加, 但 $1/(\sigma_1)$ 减小, 引起荧光透过率降低, 相互作用的结果使发光效率有一个最大值, 故在选取闪烁体长度时, 应选取使发光效率取得最大值时的晶体长度 l 值.

3) CsI(Tl) 闪烁体晶体的衬底及四周所包裹的反射层, 应尽量提高它的反射系数, 便于对晶体高度和宽度范围的选择, 有利于提高 X 光探测器的空间或几何分辨率.

4) 文中采用 Matlab, 利用无约束优化等数据处理方法, 在确保较高空间分辨率的前提下, 着眼于提高 CsI(Tl) 晶体发光效率的研究. 对中、低能 X 射线的探测, 当 $\mu_{\text{ph}}=0.000313$, $\mu_{\text{c}}=0.0000295$, $R=$

0.95, $R_s=0.8$, $\sigma=0.000222 \mu\text{m}^{-1}$ 时, 狭长 CsI(Tl) 晶体的长度 l 取值范围是 926~4512 μm , 高度 h 取值范围是 242~5000 μm , 宽度 w 取值范围是 242~5000 μm . 在此范围内, 既可使晶体有较高的空间分辨率又可获得最大的发光效率.

5) 虽然高能 X 射线 ($\geq 0.5 \text{ MeV}$) 和中、低能 X 射线 ($\leq 0.45 \text{ MeV}$) 对狭长 CsI(Tl) 晶体所产生的影响是不尽相同的, 但是中、低能 X 射线的模拟研究结果, 对高能 X 射线探测时发光效率等指标进行研究, 仍将是十分有意义的.

参考文献

- Spencer K A. Computer tomography — An Overview. *The Journal of Photographic Science*, 1989, **37**(2): 84~89
- Gilboy W B. X-and γ -ray tomography in NDE applications. *Nuclear Instruments and Methods A*, 1984, **24**(221): 193~200
- Luthi T, Flisch A, Wyss P. Industrial computed x-ray tomography. *NDT International*, 1998, **40**(3): 196~197
- Rapaport M S. A dual-mode industrial CT. *Nuclear Instruments and Methods A*, 1995, **35**(352): 652~658
- Ruegsegger P, Koller B, Ruller R. A microtomographic system for the non-destructive evaluation of bone architecture. *Calcified Tissue Int*, 1996, **58**(1): 24~29
- Clarke R. CCD x-ray detectors: opportunities and challenges. *Nuclear Instruments and Methods A*, 1994, **34**(347): 529~533
- Owens A, Rapaport M S, Wyss P. Energy deposition in x-ray CCDs and charged particle discrimination. *Nuclear Instruments and Methods A*, 1995, **35**(366): 148~154
- Tetsuhik O Takahashi, Erker J W. Design of integrated radiation detectors with a-Si photodiodes on ceramic scintillators for use in x-ray CT. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1990, **37**(3): 1478~1503
- Machin K, Webb S. Cone-beam x-ray microtomography of small samples. *Phys Med Biol*, 1994, **39**(7): 1639~1657
- Smith C R, Erker J W. Low cost. High resolution x-ray detector system for digital radiography and computed tomography. *Proc of SPIE, X-ray detector physics and applications II*, 1993, (Vol. 2009): 31~35
- Lovea M, Georgescu G H, Rizescu C, *et al.* Some aspects concerning the 2-D and 3-D computerized tomography applied in non-destructive testing. *NDT Net*, 1999, **4**(7): 5~15
- Nuzzo S, Peyrin F, Martin E, *et al.* Assessment of bone mineral content from 3-D synchrotron radiation microtomography images. *IEEE Trans On Nucl Sci*, 2001, **48**(3): 859~863
- Seung W L, Ho K K, Gyuseong C. A 3-D x-ray microtomographic system with a CMOS image sensor. *IEEE Trans On Nucl Sci*, 2001, **48**(4): 1503~1505
- 凌球, 郭兰英编著. 核辐射探测. 北京: 原子能出版社, 1992. 76~132
Ling Q, Guo L Y. Nuclear Radiation Detection, Beijing: Nuclear Power Press, 1992. 76~132
- 徐向晏, 牛憨笨. CsI: Na(CsI: T₁) 发光效率和对 X 射线的转换因子. 计算物理, 2002, **19**(3): 195~202
Xu X Y, Niu H B. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2002, **19**(3): 195~202
- 王学辉, 张明辉等编著. Matlab 6.1 最新应用详解. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. 172~205
Wang X H, Zhang M H. The application of Matlab 6.1. Beijing: China Water Electronics Press, 2001. 172~205
- Liu H F, Bao C. Investigation of lso scintillations for high resolution pet detectors. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(5): 449~453
- 郭金川, 牛憨笨, 周彬. 晶柱粘连对 CsI: Na 转换屏分辨特性的影响. 光子学报, 2001, **30**(10): 1214~1217
Guo J C, Niu H B, Zhou B. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(10): 1214~1217
- 郭金川, 牛憨笨, 周彬. 可见光在 CsI: Na 转换屏中传输的模拟研究. 光子学报, 2001, **30**(7): 801~806
Guo J C, Niu H B, Zhou B. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7): 801~806

Study of the Luminescent Efficiency for Narrow CsI (Tl) Scintillator

Wei Biao¹, Zhou Mi², Jin Donghuan¹, Feng Peng¹, Mi Deling¹

¹ The Key Lab. Of Optoelectronic Technology & System, Department of Education, Chongqing 400044

² College of Chongqing Industry, Chongqing 400039

Received date: 2004-10-25

Abstract An X-ray detector project, based on the narrow CsI (Tl) scintillating crystal and area-array CCD, using fiber optic and fiber optic plate as light coupled and transmission with fan-beam linear array scanning, has been put forth in this paper. Below 450 keV for x-ray energy, on the base of the physical analyzing and mathematical modeling, the luminescent efficiency property of narrow CsI(Tl) scintillation crystal has been studied by using Matlab. While the parameters of μ_{ph} , μ_{c} , R , R_s , and σ equal to 0.00313, 0.0000295, 0.95, 0.8, and $0.000222 \mu\text{m}^{-1}$ respectively, it is concluded that the length range of the narrow CsI (Tl) scintillation crystal is $926 \sim 4512 \mu\text{m}$, the height range is $242 \sim 5000 \mu\text{m}$, and the width is $242 \sim 5000 \mu\text{m}$. In the range of the above size, it can be obtained that space (or geometry) resolution of the narrow CsI (Tl) scintillation crystal is better and luminescent efficiency is also the highest.

Keywords X-ray; Industrial X-ray computed tomography (CT); CsI (Tl) scintillator; Luminescent efficiency; Matlab



Wei Biao was received the Ph. D. degree in nuclear electrical engineering from Chengdu University of Technology in 1996. He joined the faculty of School of Opto-electronic Engineering, University of Chongqing, where he is now Professor of Opto-electronic Engineering. His recent research work has been the research and development of industrial X-ray computed tomography (X-CT) for x-ray high efficiency detection. He is the author and co-author of 35 papers in the peer-reviewed literature.