

## 激光与光电子学进展

## X 射线能量对基于宏孔硅的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏的影响

王双双, 刘春阳\*, 王国政, 秦旭磊

长春理工大学物理学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 建立了基于宏孔硅的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏模型, 模拟分析了 X 射线能量对 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏光输出的影响。制备了周期为 10  $\mu\text{m}$ 、方孔边长为 8  $\mu\text{m}$  的 X 射线闪烁屏, 搭建了 X 射线成像装置, 测量了不同 X 射线源管电压的 X 射线成像图, 采用 Matlab 软件分析了 X 射线闪烁屏的光输出情况。研究结果表明, 闪烁屏厚度越大, 闪烁屏平均灰度值越大, 与模拟结果一致。

**关键词** X 射线光学; X 射线闪烁屏; Geant4; CsI(Tl); 宏孔硅

**中图分类号** O721 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/LOP202259.1734001

## Effect of X-Ray Energy on X-Ray CsI(Tl) Scintillation Screen Based on Macroporous Silicon

Wang Shuangshuang, Liu Chunyang\*, Wang Guozheng, Qin Xulei

College of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

**Abstract** A model of X-ray CsI(Tl) scintillation screen based on the macroporous silicon is established, and the influence of X-ray energy on the X-ray CsI(Tl) scintillation screen's light output is simulated and analyzed. An X-ray scintillation screen with a period of 10  $\mu\text{m}$  and a side length of 8  $\mu\text{m}$  was prepared, and an X-ray imaging device was constructed. The X-ray images of different X-ray source-tube voltages were measured. The light output of the X-ray scintillation screen was analyzed using MATLAB software. The results show that an increase in the thickness of the scintillation screen increases the average gray value of the scintillation screen, which is consistent with the simulation results.

**Key words** X-ray optics; X-ray scintillation screen; Geant4; CsI(Tl); macroporous silicon

## 1 引言

X 射线闪烁屏是利用闪烁晶体将 X 射线转化为可见光的成像器件, 是 X 射线成像系统的核心部件, 其性能是影响 X 射线成像质量的关键。X 射线闪烁屏已广泛应用于医学、无损检测、工业探伤等领域<sup>[1-5]</sup>。

随着 X 射线成像技术的不断发展, X 射线闪烁屏必须具有更高的分辨率和发光效率, 为了确保足够的发光效率, 闪烁屏通常需要足够的厚度, 然而, 由于闪烁光的横向传播, 增加闪烁屏厚度将会导致闪烁屏的分辨率降低<sup>[6-7]</sup>。为了克服这一局限性, 研究人员采用

热蒸发法研制了晶柱状 CsI(Tl) 闪烁屏。晶柱状 CsI(Tl) 闪烁屏可以借助 CsI(Tl) 晶柱与气隙界面所形成的全反射, 将荧光限制在晶柱内部, 从而防止荧光的横向传播<sup>[8-9]</sup>。由于很难消除晶柱之间不同程度的粘连, 导致荧光在晶柱中的横向传播依然存在, 因此这种 X 射线闪烁屏的分辨率不会很高。为了解决这一问题, 2008 年, 德国学者 Simon<sup>[10]</sup> 采用光电化学腐蚀方法, 制备出了周期为 50  $\mu\text{m}$ 、深度为 200  $\mu\text{m}$  的硅微通道阵列, 然后把 CsI(Tl) 闪烁晶体填充到硅微通道阵列里面, 成功制备出基于硅微通道阵列的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏, 其分辨率达到 9 lp/mm。2017 年, 深圳大学采

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-23; 录用日期: 2021-12-21

基金项目: 吉林省科技厅技术攻关项目(20190302125GX); 吉林省科技厅重大科技专项(20200501006GX); 吉林省科技厅重点科技研发项目(20210201031GX); 吉林省教育厅 2021 年度科学技术研究规划重点项目(JJKH20210800KJ); 吉林省产业创新专项资金项目(2019C043-6)

通信作者: \*liucy169@nenu.edu.cn

用电化学腐蚀的方法,制备出周期为  $12\ \mu\text{m}$ 、孔径为  $8\ \mu\text{m}$ 、深度为  $150\ \mu\text{m}$  和周期为  $6\ \mu\text{m}$ 、孔径为  $3\ \mu\text{m}$ 、深度为  $150\ \mu\text{m}$  的硅微通道阵列,通过把 CsI(Tl) 晶体填充到硅微通道阵列里面,成功制备出了 X 射线闪烁屏,分辨率达到  $40\ \text{lp/mm}$ <sup>[11]</sup>。基于宏孔硅的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏制备过程为:首先制备小周期的宏孔硅阵列结构,然后将宏孔硅阵列内壁氧化一层  $\text{SiO}_2$  反射层,最后将 CsI(Tl) 闪烁晶体填充到宏孔硅阵列里面。横向扩散的可见光子会被硅壁吸收<sup>[12]</sup>,使相邻的微柱之间的闪烁光的串扰可以完全消除,且 CsI(Tl) 闪烁晶体的折射率大于深孔阵列内壁  $\text{SiO}_2$  层的折射率, X 射线激发 CsI(Tl) 晶体所产生的可见光有一部分能够以全反射的方式在深孔阵列里面传输,使其损耗大幅度减少<sup>[13]</sup>,从而可制备出较高分辨率和发光效率的 X 射线闪烁屏。

X 射线入射到 CsI(Tl) 闪烁晶体中,在闪烁晶体内部发生一系列物理过程并将 X 射线转换为可见光射出,随着 X 射线能量的增加, X 射线闪烁屏转换的可见光子也随之增加,同时 X 射线的穿透能力也会增加,导致部分 X 射线穿透闪烁屏,造成 CCD 的辐射损伤,从而影响分辨率。本文利用 Geant4 软件建立基于宏孔硅的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏模型,模拟分析了 X 射线能量对 CsI(Tl) 闪烁屏光输出的影响,制备了周期为  $10\ \mu\text{m}$ 、方孔边长为  $8\ \mu\text{m}$  的 X 射线闪烁屏,并搭建了 X 射线成像装置,得到了不同 X 射线源管电压的 X 射线成像图,并采用 Matlab 软件分析了 X 射线闪烁屏的光

输出情况。

## 2 X 射线能量对 CsI(Tl) 闪烁屏光输出影响的模拟

Geant4 是由欧洲核子中心基于 C++ 语言开发的一种用于核物理和高能实验的蒙特卡罗模拟程序包<sup>[14]</sup>,被广泛应用于粒子物理、天体物理、空间科学、医学物理和辐射防护等领域。本文使用 Geant4 软件模拟分析 X 射线能量对 CsI(Tl) 闪烁屏光输出的影响。

### 2.1 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏模型的建立

#### 1) X 射线源

通过 SetParticle 设置射线源的相关参数,包含了射线源的大小、形状、位置及朝向。X 射线源模型采用一个边长为  $0.25\ \text{mm}$  的正方形,并将其放置在 World 窗口的最左端,通过软件定义射线源的能量大小。X 射线通过这个模型向右出射,穿过空气介质以及成像样品,最终入射到探测器上而被探测,穿过介质时会因为与介质的物理作用而发生粒子的衰减、散射、折射等现象。

#### 2) 基于宏孔硅的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏模型

通过 Geant4 模拟软件建立基于宏孔硅的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏模型,如图 1 所示,闪烁屏中通道阵列的周期设置为  $10\ \mu\text{m}$ ,硅壁厚度为  $1\ \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  反射层厚度为  $0.1\ \mu\text{m}$ ,通道中为铯掺杂摩尔分数为 0.09 的碘化铯,通过外部参数设定 CsI(Tl) 的密度为  $4.5\ \text{g/cm}^3$ ,折射率为 1.78,光衰减长度为  $1\ \text{m}$ <sup>[15]</sup>。

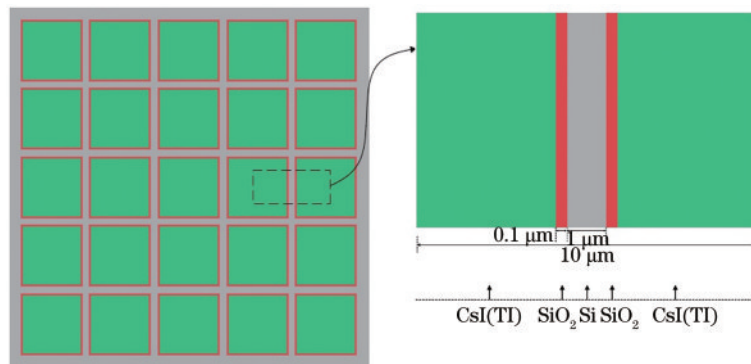


图 1 基于宏孔硅的 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of X-ray CsI(Tl) scintillation screen model based on macroporous silicon

### 2.2 物理与光学过程

X 射线与 CsI(Tl) 闪烁晶体相互作用的主要物理过程包括:光电效应、康普顿散射和电子对产生等。

在光电效应中, X 射线光子与构成原子的内层轨道电子作用时,将其全部能量都传递给原子的内层轨道电子, X 射线光子被吸收,获得能量的轨道电子摆脱原子核的束缚,成为自由电子(光电子)。光电效应过程是软 X 射线与物体主要作用方式。

在康普顿散射中, X 射线光子和原子的外层轨道电子作用时, X 射线光子部分能量会传递给外层轨道电子,

使得轨道电子脱离轨道射出,同时 X 射线光子的运动方向和能量也会随之改变。图 2 为康普顿效应示意图<sup>[16]</sup>。

作用过程中的能量传递和 X 射线光子散射角度遵从能量守恒及动量守恒定律。散射后的能量公式为

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2 (1 - \cos \theta)}} \quad (1)$$

式中:  $h\nu$  是入射 X 射线光子的能量;  $h\nu'$  是散射 X 射线光子的能量;  $\theta$  是散射 X 射线光子和入射 X 射线光子的夹角,命名为散射角;  $m_0$  为电子静止质量,  $c$  为光速。

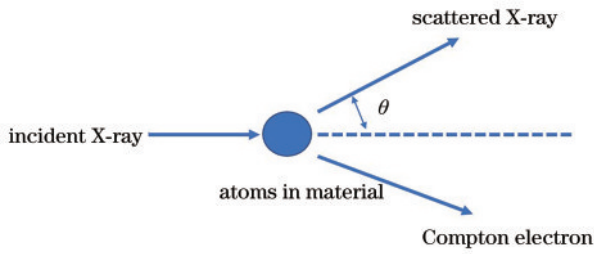


图 2 康普顿效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Compton effect

电子对的产生过程主要存在于高能 X 射线与电子相互作用。能量高于 1.02 MeV 的 X 射线光子与电子碰撞后, X 射线光子突然消失, 产生一对正负电子, 其中正电子会在吸收中发生湮没现象而对探测器产生影响<sup>[17]</sup>。

模拟仿真 X 射线能量对 CsI(Tl) 闪烁屏光输出影响的过程中, 除了考虑上述的物理过程, 还需要考虑光学过程, 主要包括瑞利散射和一些边界过程(反射、折射、吸收)<sup>[18]</sup>。

本文模拟仿真涉及到的物理与光学过程通过 Geant4 软件中的 PhysicsList 类进行定义, 主要有 G4EmStandardPhysics(标准电磁过程)、G4OpticalPhysics(光学过程)、G4DecayPhysics(衰减过程)和 G4RadioactiveDecayPhysics(辐射衰减过程)等过程。

### 2.3 X 射线能量对闪烁屏光输出的影响

#### 2.3.1 X 射线能量对闪烁屏光输出的影响

采用 Geant4 软件模拟了 X 射线能量为 0~100 keV 时闪烁屏底面光输出, 图 3 为 X 射线探测系统示意图, 设置 X 射线 CsI(Tl) 闪烁屏面积为  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ , 厚度为  $400 \mu\text{m}$ , 紧贴闪烁屏的是光电探测器, 面积也为  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ , 用于收集闪烁屏底面输出的可见光子, X 射线源与闪烁屏相距 1 cm, X 射线出射光子数为 10000 个。

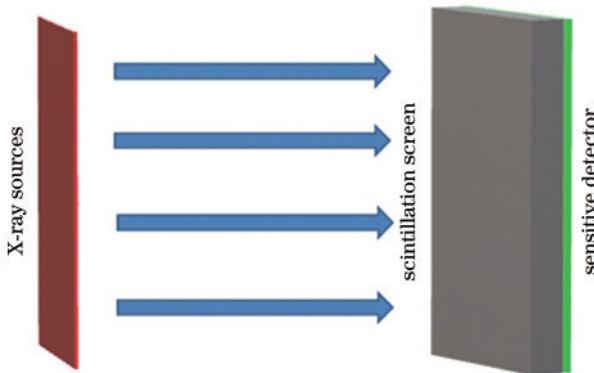


图 3 X 射线探测系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of X-ray detection system

由于蒙特卡罗模拟程序的特殊性, 每个样点采用 5 次模拟并针对参数进行加权平均处理, 绘制 X 射线能量与输出光子数关系曲线图, 最终得到曲线图如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 闪烁屏底面接收光子数

首先随 X 射线能量的增加而增加, 增加速度由快变缓, 并在 60 keV 达到顶峰。当 X 射线能量大于 60 keV 时, 底端接收光子数随 X 射线能量的增加而减少。这是由于随着 X 射线能量的增加, X 射线的穿透能力会增强, 在低 X 射线能量下, 几乎所有 X 射线都会被吸收, 闪烁屏底面接收光子数急剧增加。随着 X 射线能量的增加, 有少部分 X 射线直接穿透闪烁屏, 底面接收光子数增速变缓。随着 X 射线能量继续增加, 大部分 X 射线直接穿透闪烁屏, 底面接收光子数逐渐减少。

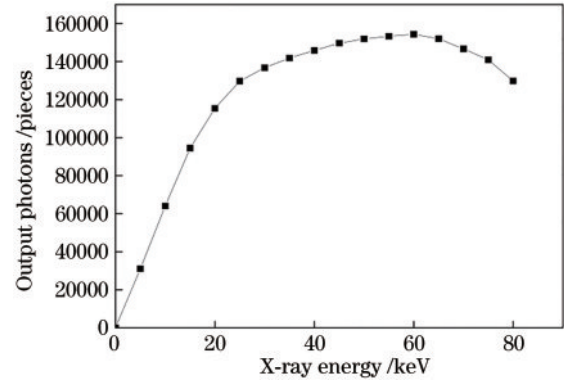


图 4 X 射线能量与输出光子数关系图

Fig. 4 X-ray energy versus number of output photons

#### 2.3.2 闪烁屏厚度对光输出的影响

采用 Geant4 软件模拟了 0~1000  $\mu\text{m}$  厚度的闪烁屏在 50、60、70、80 keV 的 X 射线能量下所得到的输出光子数, 如图 5 所示。从图中可以看出, 在相同能量的 X 射线下, 随着闪烁屏厚度的增加, 底面接收光子数逐渐增多, 最终达到或趋近于饱和状态。在相同厚度下, 闪烁屏厚度较薄时, X 射线能量越高, 输出的可见光子数越低, 闪烁屏厚度较厚时, X 射线能量越大, 闪烁屏输出光子数越多。这是由于随着闪烁屏厚度的增加, 闪烁屏可以吸收的 X 射线也随之增加, 输出的可见光子数随之增加。X 射线能量越高, 穿透闪烁屏 X 射线光子数越多, 所以在闪烁屏厚度较低时会有部分 X 射

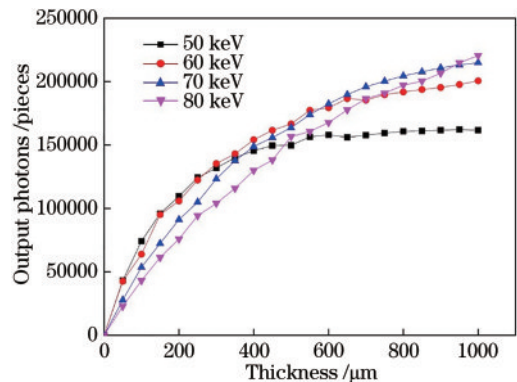


图 5 不同 X 射线能量下闪烁屏厚度与输出光子数模拟关系图  
Fig. 5 Simulation relationship between scintillation screen thickness and output photon number under different X-ray energies



线光子直接穿透闪烁屏,导致输出光子数反而越少。在闪烁屏厚度较高时,X射线被充分吸收,X射线能量越高,CsI(Tl)闪烁晶体对X射线的转换效率越高,所以最终输出可见光子数越多。

### 3 X射线能量对CsI(Tl)闪烁屏光输出影响的实验研究

宏孔硅基体采用525  $\mu\text{m}$ 厚的N型(100)晶面硅晶片,电阻率为10~20  $\Omega\cdot\text{cm}$ 。为了填充更多CsI(Tl)闪烁晶体,首先需要制备出通道壁光滑且高开口面积比的宏孔硅基体,制备流程主要包括光刻、电感耦合等离子体(ICP)刻蚀、诱导坑腐蚀、光电化学腐蚀、整形、氧化等工艺<sup>[10-12]</sup>。一般来说,随着硅孔深度的增加,填充过程的难度会增加,但通过工艺优化,采用真空热熔融填充法能很好地解决这一问题。把掺 $\text{Tl}^+$ 摩尔分数为0.09的CsI(Tl)闪烁晶体通过真空热熔融填充法填充到宏孔硅微通道阵列中,待其冷却至室温时,通过正置

抛光的方法,除去闪烁屏表面多余的CsI(Tl)闪烁晶体,制备出基于宏孔硅的CsI(Tl)闪烁屏。制备的闪烁屏方孔阵列周期为10  $\mu\text{m}$ 、方孔边长为8  $\mu\text{m}$ ,孔深分别为150  $\mu\text{m}$ 和310  $\mu\text{m}$ 。

因为闪烁屏的亮度比较低,无法直接测量出闪烁屏的亮度,所以采用对X射线闪烁屏成像的方式,得到其成像图片,再通过Matlab软件得到其图像灰度值,通过研究X射线能量与图像灰度值的关系,可得到X射线能量对闪烁屏亮度的影响。实验所用X射线源为SpellmanX4060一体化X射线源,相机采用佳能760D,X射线源管电压为80~160 kV,曝光时间为6 s,实验中保持X射线源管电流恒定,管电流为0.4 mA,当改变X射线源管电压时,X射线光子数目保持不变,只是能量发生了改变。

用相机和计算机分别获取150  $\mu\text{m}$ 和310  $\mu\text{m}$ 厚闪烁屏的X射线成像图,每张图分别选取50 pixel $\times$ 50 pixel的区域灰度照片,如图6、图7所示。

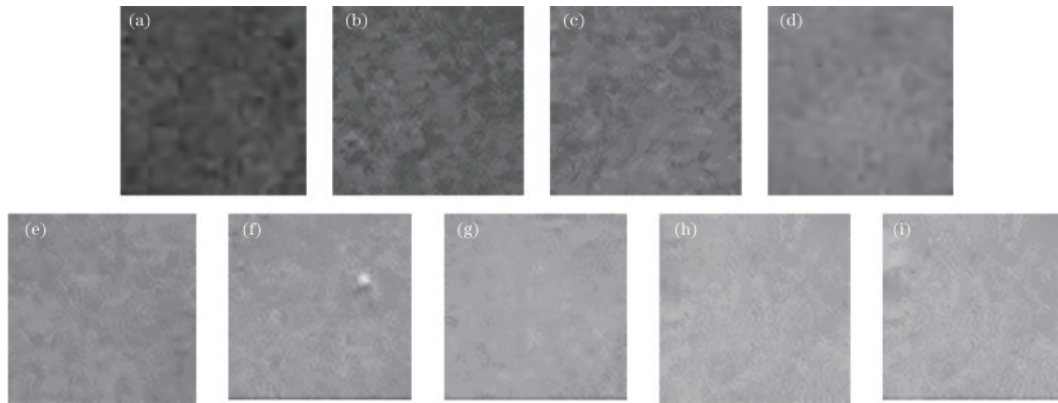


图6 不同电压下150  $\mu\text{m}$ 厚闪烁屏X射线成像图50 pixel $\times$ 50 pixel的区域灰度照片。(a)电压为80 kV;(b)电压为90 kV;(c)电压为100 kV;(d)电压为110 kV;(e)电压为120 kV;(f)电压为130 kV;(g)电压为140 kV;(h)电压为150 kV;(i)电压为160 kV

Fig. 6 50 pixel $\times$ 50 pixel area grayscale photographs of X-ray images on 150- $\mu\text{m}$  thick scintillation screen under different voltages. (a) Voltage is 80 kV; (b) voltage is 90 kV; (c) voltage is 100 kV; (d) voltage is 110 kV; (e) voltage is 120 kV; (f) voltage is 130 kV; (g) voltage is 140 kV; (h) voltage is 150 kV; (i) voltage is 160 kV

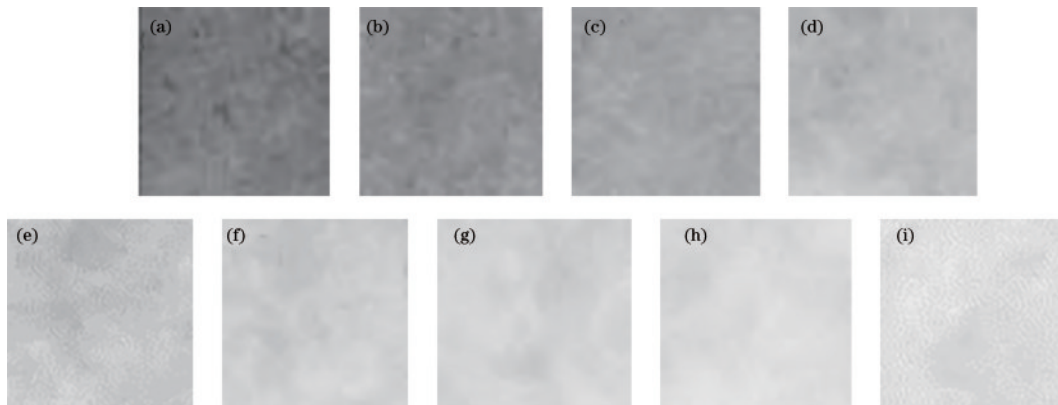


图7 不同电压下310  $\mu\text{m}$ 厚闪烁屏X射线成像图50 pixel $\times$ 50 pixel的区域灰度照片。(a)电压为80 kV;(b)电压为90 kV;(c)电压为100 kV;(d)电压为110 kV;(e)电压为120 kV;(f)电压为130 kV;(g)电压为140 kV;(h)电压为150 kV;(i)电压为160 kV

Fig. 7 50 pixel $\times$ 50 pixel area grayscale photographs of X-ray images on 310- $\mu\text{m}$  thick scintillation screen under different voltages. (a) Voltage is 80 kV; (b) voltage is 90 kV; (c) voltage is 100 kV; (d) voltage is 110 kV; (e) voltage is 120 kV; (f) voltage is 130 kV; (g) voltage is 140 kV; (h) voltage is 150 kV; (i) voltage is 160 kV

使用 Matlab 软件计算闪烁屏 X 射线成像图的平均灰度值, 绘制出 X 射线管电压和灰度值的关系曲线如图 8 所示。由图可以看出, 随着 X 射线源管电压的增加, 所有厚度的闪烁屏平均灰度值都增加, 平均灰度值上升趋势逐渐变缓, 但是并没有出现饱和的情况。这是由于所制备的闪烁屏厚度有限, 所以无法观察到上述情况的产生。在相同 X 射线管电压下, 厚度为 310  $\mu\text{m}$  的闪烁屏平均灰度值大于厚度为 150  $\mu\text{m}$  的闪烁屏, 这是由于闪烁屏厚度越大, 宏孔硅阵列填充的闪烁晶体越多, 转换的 X 射线也就越多, 平均灰度值也就越大。取 1/3 管电压来估算 X 射线源平均能量, 可知 X 射线源管电压在 80~160 kV 时平均能量约为 26.7~53.3 keV<sup>[19]</sup>, 在此区间内实验结果与 X 射线能量对闪烁屏光输出的影响模拟结果一致。

150  $\mu\text{m}$  和 310  $\mu\text{m}$  厚闪烁屏在 X 射线源管电压分别为 80、120、160 kV, 曝光时间为 6 s 时, X 射线管电流和闪烁屏平均灰度值的关系曲线如图 9 所示。由图可以看出, 随着 X 射线源管电流的增加, 闪烁屏平均灰度

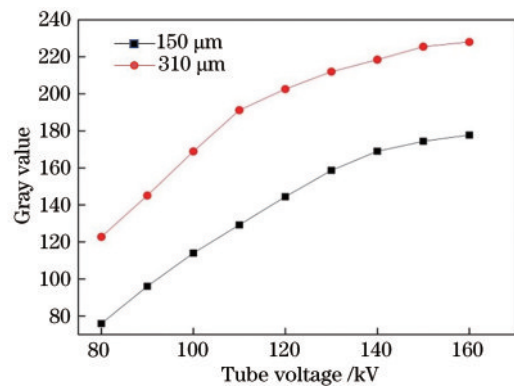


图 8 X 射线源管电压和不同厚度闪烁屏平均灰度值的关系曲线图

Fig. 8 Curve diagram of relationship between tube voltage of X-ray source and average gray value of scintillation screen with different thicknesses

值增加, 平均灰度值上升趋势变缓, 由于 X 射线源管电流范围有限, 并未达到饱和状态, 当 X 射线管电流为 0.4 mA 时, 闪烁屏工作在 X 射线线性响应区域内。

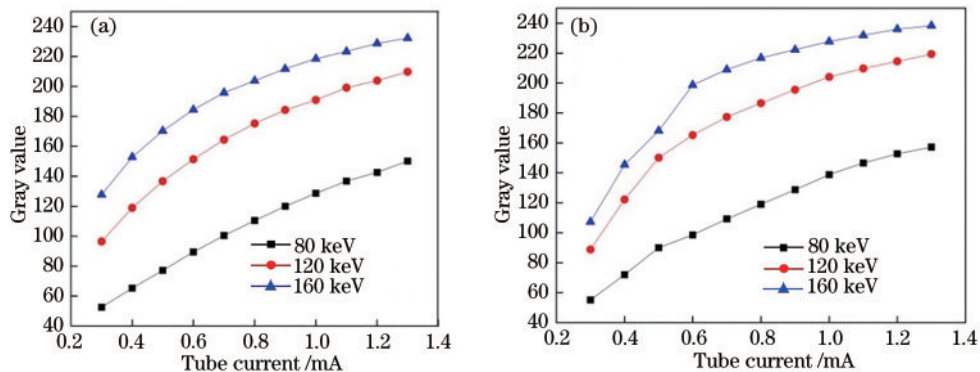


图 9 不同厚度闪烁屏的 X 射线源管电流和平均灰度值的关系曲线图。(a) 厚度为 150  $\mu\text{m}$ ; (b) 厚度为 310  $\mu\text{m}$

Fig. 9 Curve diagram of relationship between tube current of X-ray source and average gray value of scintillation screen with different thicknesses. (a) Thickness is 150  $\mu\text{m}$ ; (b) thickness is 310  $\mu\text{m}$

## 4 结 论

采用 Geant4 软件建立了基于宏孔硅的 X 射线 CsI (Tl) 闪烁屏模型, 模拟了 X 射线能量对闪烁屏光输出的影响。模拟结果表明: 随着 X 射线能量增加, 闪烁屏底端输出光子数先急剧增加, 在达到顶峰后逐渐减小; 在相同能量的 X 射线下, 随着闪烁屏厚度的增加, 底面接收光子数逐渐增多, 最终达到或趋近于饱和状态。制备了基于宏孔硅的 X 射线 CsI (Tl) 闪烁屏并进行了测试, 结果表明: X 射线能量越大, 闪烁屏厚度越大, 闪烁屏平均灰度值越大, 这与模拟结果一致。

## 参 考 文 献

- [1] Jing T, Goodman C A, Drewery J, et al. Amorphous silicon pixel layers with cesium iodide converters for medical radiography[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, 41(4): 903-909.
- [2] van E C W. Inorganic scintillators in medical imaging[J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(8): R85-R106.
- [3] Nagarkar V V, Gupta T K, Miller S R, et al. Structured CsI(Tl) scintillators for X-ray imaging applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(3): 492-496.
- [4] 王宗朋, 蓝重洲, 文敏儒, 等. 多层平板探测的 X 射线多能成像方法[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 0911003. Wang Z P, Lan C Z, Wen M R, et al. X-ray multi-energy imaging method using multi-layer flat panel detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 0911003.
- [5] Su Y R, Ma W B, Yang Y M. Perovskite semiconductors for direct X-ray detection and imaging[J]. Journal of Semiconductors, 2020, 41(5): 051204.
- [6] Fujieda I, Cho G, Drewery J, et al. X-ray and charged particle detection with CsI(Tl) layer coupled to a Si: H photodiode layers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1991, 38(2): 255-262.

- [7] Nagarkar V V, Tipnis S V, Gaysinskiy V B, et al. New design of a structured CsI(Tl) screen for digital mammography[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5030: 541-546.
- [8] Kim B J, Cha B K, Jeon H, et al. A study on spatial resolution of pixelated CsI(Tl) scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 579(1): 205-207.
- [9] Nikl M. Scintillation detectors for X-rays[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(4): R37-R54.
- [10] Simon M, Engel K J, Menser B, et al. X-ray imaging performance of scintillator-filled silicon pore arrays[J]. Medical Physics, 2008, 35(3): 968-981.
- [11] 肖飞虎. 硅基微结构制作及其在 X 射线探测器研制中的应用研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.  
Xiao F H. Study on fabrication of silicon-based microstructures and its application in the X-ray detectors [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [12] 王宇, 周燕萍, 李茂林, 等. 用于垂直腔面发射激光器的 GaAs/AlGaAs 的 ICP 刻蚀工艺研究[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0401005.  
Wang Y, Zhou Y P, Li M L, et al. ICP etching process of GaAs/AlGaAs for vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0401005.
- [13] Soref R A, Bennett B R. Electrooptical effects in silicon [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123-129.
- [14] Badel X, Norlin B, Kleimann P, et al. Performance of scintillating waveguides for CCD-based X-ray detectors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(1): 3-8.
- [15] Geant4 Collaboration. Geant4 user's guide[EB/OL]. [2021-05-06]. <http://geant4.cern.ch/support/index.shtml>.
- [16] Grassmann H, Lorenz E, Moser H G. Properties of CsI (Tl): renaissance of an old scintillation material[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1985, 228(2/3): 323-326.
- [17] 郑世才. 康普顿散射成像技术试验[J]. 无损检测, 1995, 17(11): 301-304.  
Zheng S C. Experiment on Compton scatter imaging method[J]. Nondestructive Testing, 1995, 17(11): 301-304.
- [18] 陈津平, 杨峻雄, 邹晶, 等. 基于 Geant4 仿真的 CsI(Tl) 闪烁体厚度优化[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(6): 444-448.  
Chen J P, Yang J X, Zou J, et al. Optimization of CsI (Tl) scintillator thickness based on Geant4 simulation[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(6): 444-448.
- [19] 张玉爱, 苗积臣, 吴志芳. X 射线测厚管电压与测厚范围的关系的实验研究[C]//中国核学会 2015 年学术年会. 北京: 中国核学会, 2015.  
Zhang Y A, Miao J C, Wu Z F. Experimental study on the relationship between X-ray thickness tube voltage and thickness measurement range[C]//2015 Academic Annual Meeting of China Nuclear Society. Beijing: Chinese Nuclear Society, 2015.