

## 光纤耦合 GAGG\_Ce 型 X 射线探测器高分辨成像

安康<sup>1,2</sup>, 李汶芳<sup>1,2</sup>, 段晓礁<sup>1,2</sup>, 吴石琳<sup>1,2</sup>, 周日峰<sup>1,2</sup>, 王珏<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;<sup>2</sup>工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044

**摘要** 闪烁屏信号串扰是影响 X 射线探测器空间分辨率的主要因素, 基于点扩散函数理论对光纤耦合 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏型 CCD/CMOS 探测器的空间分辨率进行了研究。利用蒙特卡罗程序 EGSnrc 和光学仿真软件 Zemax 分别对 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏射线串扰和荧光串扰进行了仿真。仿真结果表明, 对于低能 X 射线辐射成像, 荧光串扰是影响探测器空间分辨率的最主要因素。此外, 研究了通过降低光纤面板数值孔径以抑制荧光串扰的方法, 得到了光纤面板数值孔径与探测器空间分辨率和 X 射线转换因子间的关系, 并通过自制 CCD 探测器测试验证了仿真结果的正确性。

**关键词** 成像系统; 光纤成像; GAGG\_Ce; 数值孔径; 串扰; 空间分辨率; X 射线转换因子

中图分类号 O434.19

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0111001

## Fiber-Coupled GAGG\_Ce X-ray Detector for High-Resolution Imaging

An Kang<sup>1,2</sup>, Li Wenfang<sup>1,2</sup>, Duan Xiaojiao<sup>1,2</sup>, Wu Shilin<sup>1,2</sup>, Zhou Rifeng<sup>1,2</sup>, Wang Jue<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;<sup>2</sup>Engineering Research Center of Industrial CT Nondestructive Testing of Ministry of Education, Chongqing 400044, China

**Abstract** The crosstalk of scintillation screen signals is the main factor that affects the spatial resolution of X-ray detectors. The spatial resolution of fiber-coupled GAGG\_Ce single crystal scintillation screen CCD/CMOS detector is studied based on the point spread function theory. The ray crosstalk of GAGG\_Ce single crystal scintillation screen and fluorescence crosstalk are simulated by Monte Carlo program EGSnrc and optical simulation software Zemax respectively. The simulation results show that fluorescence crosstalk is the most important factor affecting the spatial resolution of the detector for low-energy X-ray radiation imaging. In addition, the method of suppressing fluorescence crosstalk by reducing the numerical aperture of optical fiber panel is studied, and the relationship among numerical aperture of optical fiber panel, detector spatial resolution and X-ray conversion factor is obtained. The correctness of the simulation results is verified by the self-made CCD detector test.

**Key words** imaging systems; optical fiber imaging; GAGG\_Ce; numerical aperture; crosstalk; spatial resolution; X-ray conversion factor

## 1 引言

微纳计算机断层成像(CT)系统是空间分辨率达到微米级或纳米级的计算机层析成像系统的统称<sup>[1]</sup>。微纳 CT 系统作为一种先进的高精度无损检

测系统<sup>[2]</sup>, 已被广泛应用于地质研究<sup>[3]</sup>、生物医学研究<sup>[4]</sup>、新材料研究等领域中, 可实现对岩土、细胞及新材料等样品微结构的高分辨检测分析。平板探测器作为微纳 CT 系统的重要组成部件, 其空间分辨率直接影响微纳 CT 系统对微结构的检测能力。以

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-07-16; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(11827809)

通信作者: \*wangjue@cqu.edu.cn

将 CCD/CMOS 作为图像传感器的高分辨 X 射线 CCD/CMOS 探测器<sup>[5]</sup>为例,该探测器的极限空间分辨率可达微米级甚至百纳米级,故其在微纳 CT 系统中得到了广泛应用。

在低能 X 射线辐射成像应用中,平板探测器通常使用 CsI(Tl)闪烁屏,其微柱状结构能够实现较高的空间分辨率和 X 射线转换效率<sup>[6]</sup>。目前,研究人员已经对 CsI(Tl)闪烁屏进行了大量研究。徐向晏等<sup>[7]</sup>研究了 CsI(Tl)荧光透过率对 X 射线转化因子的影响,得到了不同射线能量下的最佳闪烁屏厚度。王静等<sup>[8]</sup>研究了能量为 1~5 keV 的软 X 射线在不同厚度 CsI(Tl)闪烁屏中的沉积效率。陈津平等<sup>[9]</sup>研究了在 20~80 keV 能量的 X 射线下不同厚度 CsI(Tl)闪烁屏对探测器空间分辨率的影响,力求找出最佳应用厚度。然而,CsI(Tl)生长时需达到一定厚度才能呈现出有序的微柱状结构,常用 CsI(Tl)闪烁屏的厚度大于 130  $\mu\text{m}$ ,分辨率低于 15 lp/mm。在高分辨 CCD/CMOS 探测器研制中,为实现优于 20 lp/mm 的空间分辨率,通常选用单晶闪烁屏<sup>[10]</sup>。Andor 公司生产的 iKon-L HF 型 CCD 探测器基于 40  $\mu\text{m}$  厚的 YAG:Ce 和 LuAG:Ce 单晶闪烁屏,实现了优于 15 lp/mm 的空间分辨率;该公司生产的 Zyla-HF 型 sCMOS 探测器基于 20  $\mu\text{m}$  厚的 YAG:Ce 和 LuAG:Ce 单晶闪烁屏,实现了优于 30 lp/mm 的空间分辨率。GAGG\_Ce ( $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ )<sup>[10-12]</sup>是已知氧化物中光产额最高的单晶闪烁体,并且具有不潮解、光产额高、有效原子序数高、密度大、可塑性好等优点,故成为了近年来高性能探测器闪烁屏应用研究的热点。

本文对基于光纤耦合 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏的探测器的高分辨 X 射线辐射成像进行了研究。以 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏的信号串扰为研究对象,基

于点扩散函数理论对探测器空间分辨率进行了仿真与实验研究。首先,利用蒙特卡罗仿真程序 EGSnrc 建立离散化 GAGG\_Ce 闪烁屏模型,仿真得到了能量为 20~100 keV 的单束 X 射线的光子入射 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏后各分层吸收剂量的点扩散分布。然后,利用光学仿真软件 Zemax 建立与蒙特卡罗仿真对应的离散化闪烁屏模型,将荧光点源置于闪烁屏仿真模型各分层的中心体素位置,得出 CCD 对各分层荧光吸收的点扩散分布。仿真结果表明,荧光串扰是影响探测器空间分辨率的主要因素,并且降低光纤面板的数值孔径(NA)可以抑制荧光串扰对探测器空间分辨率及探测器 X 射线转换因子的影响。

## 2 光纤耦合 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏的信号串扰仿真

在理想情况下,闪烁屏吸收入射 X 射线后发射的荧光应被图像传感器中对应的像元接收。然而,在实际情况下,一方面入射 X 射线的光子会与闪烁屏间发生光电效应、康普顿散射等相互作用,此时光子的运动方向会偏离原来的入射方向,部分光子会被闪烁屏相邻像元吸收,进而形成 X 射线散射串扰<sup>[13-14]</sup>。另一方面,在高分辨探测应用中通常将 CCD/CMOS 作为图像传感器,由于像元尺寸为微米级,难以在 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏像元间实现荧光隔离,此时闪烁屏各向同性发光会形成荧光串扰<sup>[15-16]</sup>,如图 1 所示,其中  $I$  表示 CCD 像元的荧光吸收强度。闪烁屏的 X 射线散射串扰与荧光串扰会造成探测器空间分辨率的降低,本文利用点扩散函数(PSF,  $f_{\text{PSF}}$ )<sup>[17]</sup>对上述两类串扰进行了仿真研究。

当 X 射线垂直入射闪烁屏中心像元后,闪烁屏的各体素吸收剂量分布可表示为

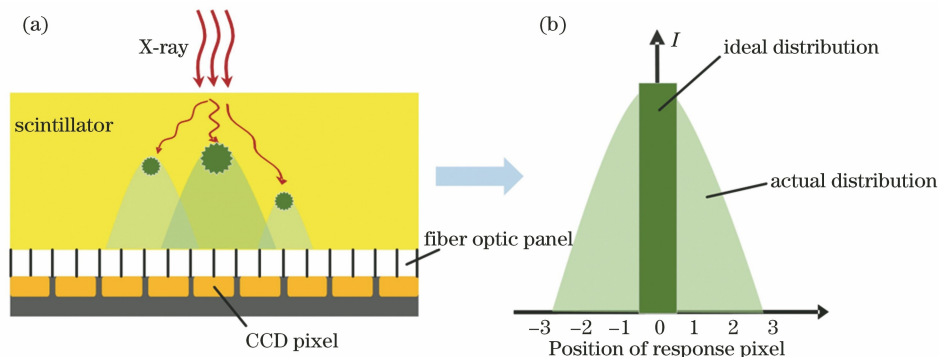


图 1 闪烁屏信号串扰原理图。(a) X 射线散射串扰与荧光串扰示意图;(b) CCD 像元对荧光的响应分布

Fig. 1 Schematic diagram of signal crosstalk in scintillation screen. (a) Schematic diagram of X-ray scattering crosstalk and fluorescence crosstalk; (b) response distribution of CCD pixel to fluorescence

$$A(i, j, k) = \int_{(k+1/2)l}^{(k+1/2)l} \int_{(j+1/2)l}^{(j+1/2)l} \int_{(i-1/2)l}^{(i+1/2)l} f(x, y, z) dx dy dz, \quad (1)$$

式中:  $(i, j, k)$  为闪烁屏体素坐标;  $f(x, y, z)$  为闪烁屏 X 射线吸收剂量分布;  $l$  为闪烁屏体素边长。

闪烁屏在吸收 X 射线光子后会受激产生荧光, 第  $k$  层闪烁屏中心像元产生的荧光被 CCD/CMOS 吸收的响应分布可表示为

$$B_k(m, n) = \int_{(n-1/2)l}^{(n-1/2)l} \int_{(m-1/2)l}^{(m-1/2)l} f_k(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (2)$$

式中:  $(m, n)$  为 CCD 像元;  $f_k(x_1, y_1)$  为 CCD/CMOS 第  $k$  层闪烁层中心体素产生的荧光的点扩散吸收分布。

设响应方阵  $B(m, n)$  的行/列像元数为  $2R+1$ , 可得到探测器的 PSF 为

$$f_{\text{PSF}} = \sum_{k=1}^L B_k(m, n) * A(i, j, k) = \sum_{k=1}^L \sum_{j=m-R}^{m+R} \sum_{i=m-R}^{m+R} B_k(m, n) A(i, j, k), \quad (3)$$

式中:  $L$  为闪烁屏分层数(以 X 射线入射面为第 1 层);  $*$  表示卷积运算。由于 X 射线与物质的相互作用存在随机性, 因此 PSF 难以通过理论计算得到, 理想的方法是通过模拟仿真获得。

### 2.1 闪烁屏的 X 射线散射串扰仿真

EGSnrc 是基于蒙特卡罗方法的仿真程序, 能模拟前 100 号元素组成的单质、化合物、混合物及各种形状物质中的电子和光子的输运过程, X 射线能量范围可以从 1 keV 增加至几 TeV, 涉及的物理过程包括光电效应、康普顿散射效应、电子对效应及瑞利散射等<sup>[18-19]</sup>。本文应用 EGSnrc 程序对 X 射线散射分布进行仿真, 以 GAGG\_Ce 闪烁体为研究对象, 建立的仿真模型如图 2 所示, 模型参数设置见表 1。

蒙特卡罗仿真的结果为 X 射线在闪烁屏体素的吸收剂量分布, 仿真结果如图 3 所示。图 3(a) 为闪烁屏第 1 层(近 X 射线的光子入射面层)中的 X 射线吸收剂量分布。通过仿真结果可计算出闪烁屏 X 射线散射串扰率分布曲线, 闪烁屏第  $k$  层像元的 X 射线散射串扰率为

$$\beta_{k_i} = \frac{D_{k_i}}{D_{k_0}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:  $D_{k_0}$  为第  $k$  层最大体素的吸收剂量;  $D_{k_i}$  为第  $k$  层第  $i$  个体素的吸收剂量。在第 1, 25, 50 层闪烁屏

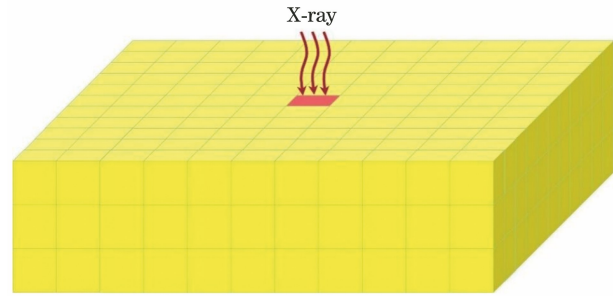


图 2 X 射线散射仿真模型

Fig. 2 Simulation model of X-ray scattering

表 1 蒙特卡罗仿真主要参数

Table 1 Main parameters for Monte Carlo simulation

Parameter	Value
Type of scintillator	GAGG_Ce (Gd <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub> :Ge)
Density of scintillator / (g·cm <sup>-3</sup> )	6.63
Size of scintillator / (μm×μm×μm)	110×110×500
Number of particles tracked	1×10 <sup>7</sup>
Size of single element / (μm×μm×μm)	10×10×10
X-ray energy / keV	20~100
Cross section size of incident ray / (μm×μm)	10×10

中, 中心行像元的 X 射线散射串扰率曲线如图 3(b) 所示。表 2 为在不同 X 射线能量下, 最大吸收剂量体素对其紧邻体素的散射串扰率。

表 2 最大吸收剂量体素对其紧邻体素的散射串扰率

Table 2 Scattering crosstalk rate of maximal absorbed dose voxel to its adjacent voxels

X-ray energy / keV	Crosstalk rate in the 1st layer / %	Crosstalk rate in the 25th layer / %	Crosstalk rate in the 50th layer / %
20	0.69	1.05	
40	3.80	4.13	4.05
60	3.96	4.92	4.20
80	6.09	7.12	6.45
100	10.21	11.59	10.49

从图 3(a)中可以看出, 闪烁屏中心体素吸收的光子最多, 且离 X 射线入射位置越远, 散射串扰越小。由图 3(b)和表 2 可知, 当 X 射线能量一定时, 各层闪烁屏的串扰率曲线大致相同, 散射串扰随 X 射线能量的提升而增大。当入射 X 射线能量为 20 keV 时, 相邻像元间的散射串扰率约为 1%。当入射 X 射线能量为 100 keV 时, 相邻像元间的散射



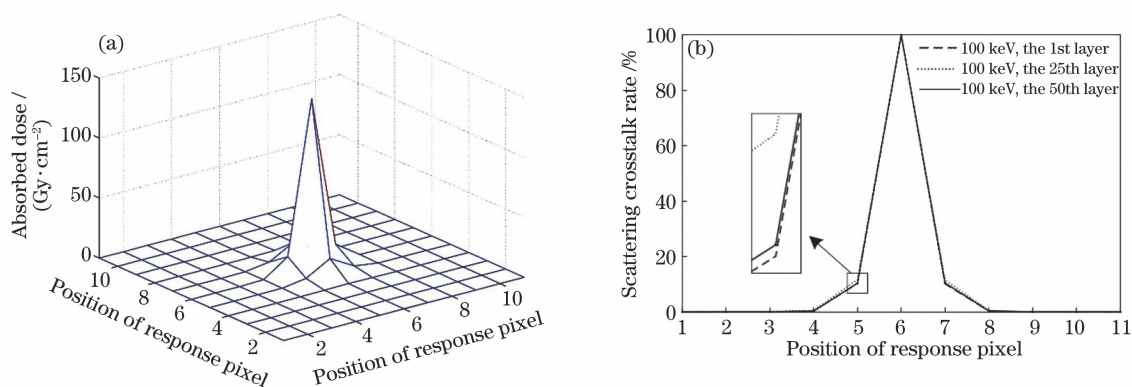


图 3 X 射线散射仿真结果。(a) 闪烁屏第 1 层中 X 射线吸收剂量分布;(b) 在闪烁屏第 1,25,50 层中,中心行像元的射线散射串扰率曲线

Fig. 3 Simulation results of X-ray scattering. (a) X-ray absorbed dose distribution in the 1st layer of scintillation screen; (b) ray scattering crosstalk rate curves of central row pixels in the 1st, 25th, and 50th layers of scintillation screen

串扰率约为 11%。对于管电压小于 100 kV 的 X 射线源,其综合散射串扰率低于 10%。

## 2.2 荧光串扰仿真

Zemax 是一款使用光子追迹方法模拟光束反

射、折射、偏振等过程的光学设计和仿真软件,本文选用 Zemax 软件中的 Zemax OpticStudio 模块进行闪烁屏荧光串扰与图像传感器响应的仿真<sup>[20-21]</sup>。荧光串扰仿真模型如图 4 所示,仿真的主要参数见表 3。

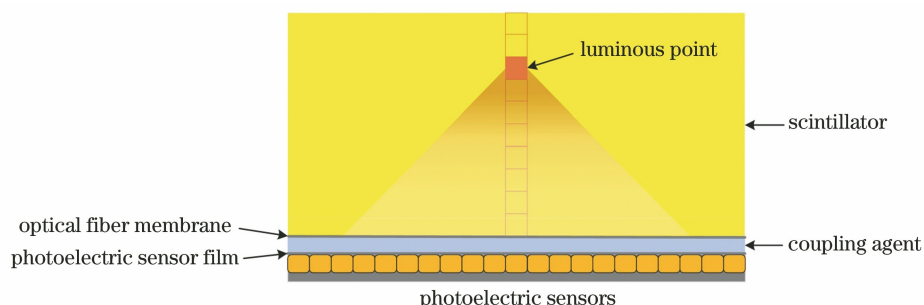


图 4 荧光串扰仿真模型

Fig. 4 Simulation model of fluorescence crosstalk

表 3 荧光串扰仿真主要参数

Table 3 Main parameters for fluorescence crosstalk simulation

Parameter	Value
Size of luminous body / ( $\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	10×10×10
Size of scintillator / ( $\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	2000×2000×500
Power of luminous body /W	1
Refractive index of GAGG_Ce	1.91
Refractive index of coupling agent	1.43
Thickness of coupling agent / $\mu\text{m}$	3
Numerical aperture of optical fiber	1.43
Number of particles tracked	1×10 <sup>7</sup>

在 Zemax 仿真中,采用全帧 CCD KAF-8300 建立图像传感器模型,利用 KAF-8300 角度响应与光谱响应参数计算光电传感器模型参数,将折射率

为 1.43 的道康宁 184 光学耦合剂作为耦合层,仿真结果为闪烁屏各层中心体素荧光的 CCD 吸收分布,如图 5 所示。图 5(a)为闪烁屏第 1 层(表层)中的中心体素荧光的 CCD 吸收分布。参考(4)式,将 CCD 中心像元(最大荧光吸收像元)的荧光辐照度作为分母,进行归一化计算,可得到各层荧光串扰率分布曲线。第 1,25,50 层闪烁屏中的荧光串扰率曲线如图 5(b)所示。表 4 为在不同闪烁层中,中心体素荧光对其相邻像元的荧光串扰率。

从图 5(b)中可以看出,发光源离 CCD 越远,荧光串扰越严重。由表 4 可知,对于荧光串扰最小的闪烁层(贴近 CCD),荧光串扰率依旧高于 25%。通过综合计算可以得出,厚度大于 70  $\mu\text{m}$  的闪烁屏的荧光串扰率高于 50%。由此可见,荧光串扰对探测器空间分辨率的影响远远大于 X 射线散射串扰。

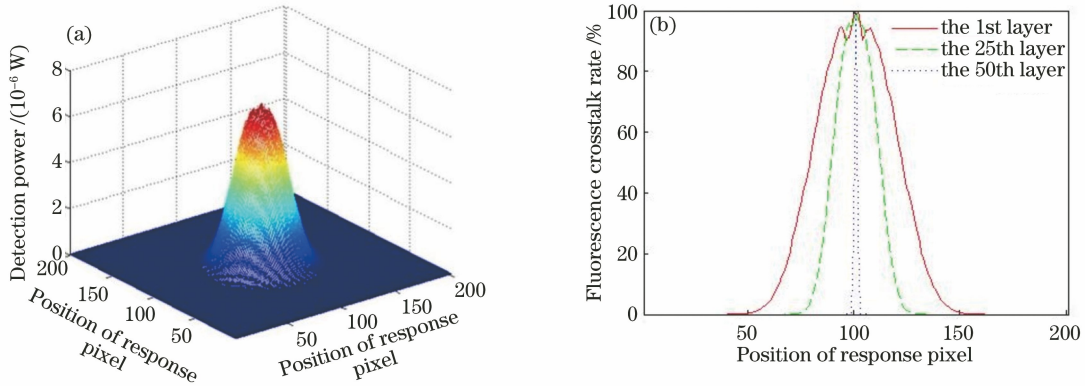


图 5 荧光串扰仿真结果。(a)在闪烁屏第 1 层中,中心体素荧光的 CCD 吸收分布;(b)在闪烁屏第 1,25,50 层中,中心行像元的荧光串扰率曲线

Fig. 5 Simulation results of fluorescence crosstalk. (a) CCD absorption distribution of fluorescence of central voxel in the 1st layer of scintillation screen; (b) fluorescence crosstalk rate curves of central row pixels of the 1st, 25th, and 50th layers in scintillation screen

表 4 中心体素荧光对紧邻像元的串扰率

Table 4 Crosstalk rate of fluorescence of central voxel to adjacent pixels

Location of luminous body	Crosstalk rate /%
1st layer	98.67
25th layer	97.04
50th layer	25.92

将 2.1 节和 2.2 节的仿真结果代入(3)式可得到探测器的点扩散函数,其与探测器调制传递函数(MTF,  $f_{MTF}$ )的关系为

$$\begin{cases} f_{PSF} = \mathcal{F}(f_{MTF}) \\ f_{MTF} = \mathcal{F}^{-1}(f_{PSF}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\mathcal{F}(\cdot)$ 表示傅里叶变换; $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 表示傅里叶逆变换。

### 3 荧光串扰抑制对探测器空间分辨率的影响

从第 2 节的分析可知,闪烁屏荧光串扰是影响探测器空间分辨率的主要因素。为提高探测器空间分辨率,本文对降低光纤面板数值孔径以抑制荧光串扰的方法进行了研究。同时,通过建模仿真的方式得到了降低光纤面板数值孔径后 CCD 的荧光吸收分布,并探究了荧光抑制对空间分辨率及探测器 X 射线转换因子的影响。

闪烁屏发出的荧光是经过光纤传入到 CCD 图像传感器的,故光纤数值孔径的大小直接决定了闪烁屏荧光串扰的可输出角度。光纤数值孔径是一个无量纲的数,它表示光纤接收和传输光的能力。对

于同一介质的入射光,光纤数值孔径越大,其可接收和传输的光线的角度越大。光纤数值孔径的计算公式为

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (6)$$

式中: $n_1$  和  $n_2$  分别为光纤的芯层折射率和包层折射率。由(6)式可计算出光纤可接收和传输的光线的最大角度  $\varphi$ ,其表达式为

$$\varphi = \arcsin(NA/n_s), \quad (7)$$

式中: $n_s$  表示闪烁屏的折射率。当荧光入射角  $\varphi_1 < \varphi$  时,荧光折射进光纤后,在光纤芯层与包层间形成全反射并最终传输到 CCD 图像传感器上。当荧光入射角  $\varphi_1 > \varphi$  时,荧光折射进光纤后,在光纤芯层与包层间形成折射并进入光纤包层中,最终被黑料吸收。

通过减小光纤面板数值孔径,可以减小准入射光线的角度,进而抑制荧光串扰,提高探测器空间分辨率。然而,荧光吸收抑制会降低探测器的探测效率。增大光纤面板数值孔径可增加入射光的总通量,提高探测器探测效率,但会降低探测器的空间分辨率。因此,探测效率和空间分辨率是一对需要平衡的指标。

#### 3.1 空间分辨率

选用厚度为 70  $\mu\text{m}$  的 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏建立了 Zemax 仿真模型,在将光纤面板数值孔径分别调整为 1.0,0.6,0.2 后进行了 CCD 荧光串扰仿真。综合荧光串扰仿真结果与 X 射线散射仿真结果,利用(3)式和(4)式可计算得到探测器的调制传递函数,如图 6 所示。

从图6中的曲线趋势可知,当闪烁屏厚度一定,

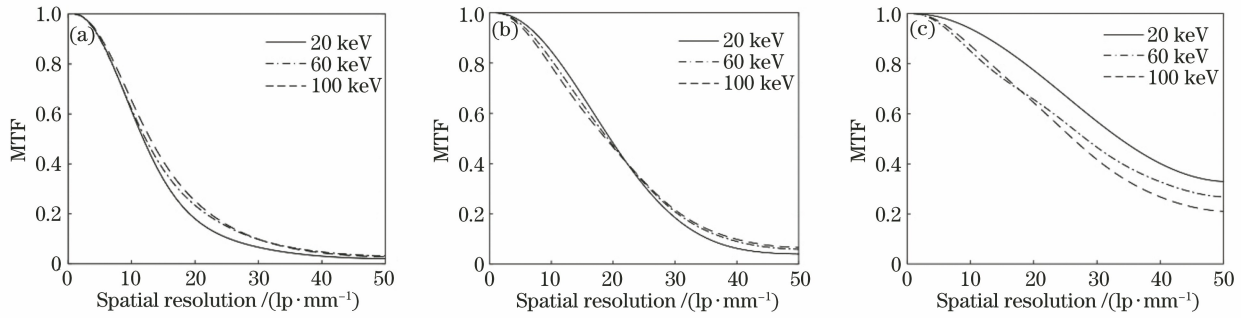


图 6 光纤面板数值孔径对闪烁屏空间分辨率的影响。(a)  $NA=1.0$ ; (b)  $NA=0.6$ ; (c)  $NA=0.2$

Fig. 6 Effect of numerical aperture of optical fiber panel on spatial resolution of scintillation screen.

(a)  $NA=1.0$ ; (b)  $NA=0.6$ ; (c)  $NA=0.2$

光纤面板数值孔径由 1.0 降低至 0.2 时,探测器的空间分辨率在提升,这与理论分析结果一致。

### 3.2 X 射线转换因子

X 射线转换因子描述了一个 X 射线光子入射闪烁屏后产生的荧光被光电探测器接收后产生的光生载流子对数,可用来定性描述探测器的探测效率。X 射线转换因子越大,探测效率越高<sup>[22]</sup>,其公式为

$$g = E_X P_h \mu \bar{\mu}_r, \quad (8)$$

式中: $E_X$  为 X 射线的能量; $P_h$  为闪烁屏的光产额; $\mu$  为闪烁屏射线沉积率; $\bar{\mu}_r$  为探测器荧光探测效率的平均值,其公式为

$$\bar{\mu}_r = \frac{n_s - \sqrt{n_s^2 - n_c^2}}{2n_s}, \quad (9)$$

式中: $n_c$  为耦合剂的折射率。综合  $70 \mu\text{m}$  厚的 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏射线散射仿真与荧光串扰仿真结果,利用(7)式计算出不同光纤面板数值孔径下,GAGG\_Ce 单晶闪烁屏的 X 射线转换因子,如表 5 所示。

表 5 不同光纤面板数值孔径下的 X 射线转换因子

Table 5 X-ray conversion factors under different numerical apertures of optical fiber panels

NA	$E_X/\text{keV}$				
	20	40	60	80	100
0.2	0.57	0.32	0.38	0.32	0.25
0.6	5.39	3.02	3.62	3.03	2.37
1.0	12.07	6.77	8.10	6.79	5.31

由表 5 可见,当 X 射线能量一定时,随着光纤数值孔径的减小,探测器 X 射线转化因子在不断减小。

## 4 实验验证与结果分析

本文搭建了相应的测试平台,采用日本滨松闭管微焦点 X 射线源 L10321,其管电压为  $40 \sim 100 \text{ kV}$ ,最大输出功率为  $20 \text{ W}$ ,焦点尺寸为  $5 \sim$

$30 \mu\text{m}$ 。当功率为  $4 \text{ W}$  时,焦点尺寸为  $5 \mu\text{m}$ 。X 射线辐射成像测试平台如图 7 所示。

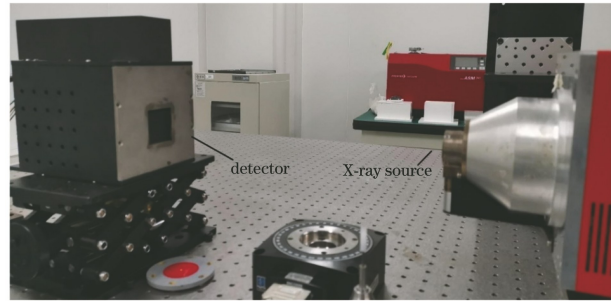


图 7 X 射线辐射成像测试平台

Fig. 7 X-ray radiation imaging test platform

图 8 展示了 CCD 探测器的主要组成元件,包括厚度为  $10 \text{ mm}$ 、数值孔径为 1 的光纤面板,其中光纤的芯层直径为  $5.2 \mu\text{m}$ ,折射率为 1.830,包层外径为  $6.0 \mu\text{m}$ ,折射率为 1.505;像元尺寸为  $5.4 \mu\text{m} \times 5.4 \mu\text{m}$  的全帧 CCD 图像传感器 KAF-8300;中国电子科技集团公司第二十六研究所生产的厚度为  $70 \mu\text{m}$  的 GAGG\_Ce 单晶闪烁屏;厚度为  $1 \text{ mm}$ 、数值孔径为 0.2 的光纤面板。

为对仿真结果进行验证,在验证实验中采用两种探测器。一种是将  $70 \mu\text{m}$  厚的 GAGG\_Ce 闪烁屏直接与  $10 \text{ mm}$  厚、 $NA=1$  的光纤面板耦合,如图 9(a) 所示;另一种是将  $70 \mu\text{m}$  厚的 GAGG\_Ce 闪烁屏与  $10 \text{ mm}$  厚的光纤面板之间通过  $NA=0.2$  的低数值光纤面板耦合,如图 9(b) 所示,其中光纤的芯层直径为  $5.2 \mu\text{m}$ ,折射率为 1.524,包层外径为  $6.0 \mu\text{m}$ ,折射率为 1.510。

采用如图 10 所示的双丝像质计与剃须刀片进行探测器空间分辨率测试,将双丝像质计<sup>[23]</sup>紧贴 X 射线探测窗口放置,射线源管电压设置为  $90 \text{ kV}$ ,管电流设置为  $50 \mu\text{A}$ ,积分  $2 \text{ s}$  后可得到双丝像质计的数字射线投影(DR)图像,如图 11(a) 所示。



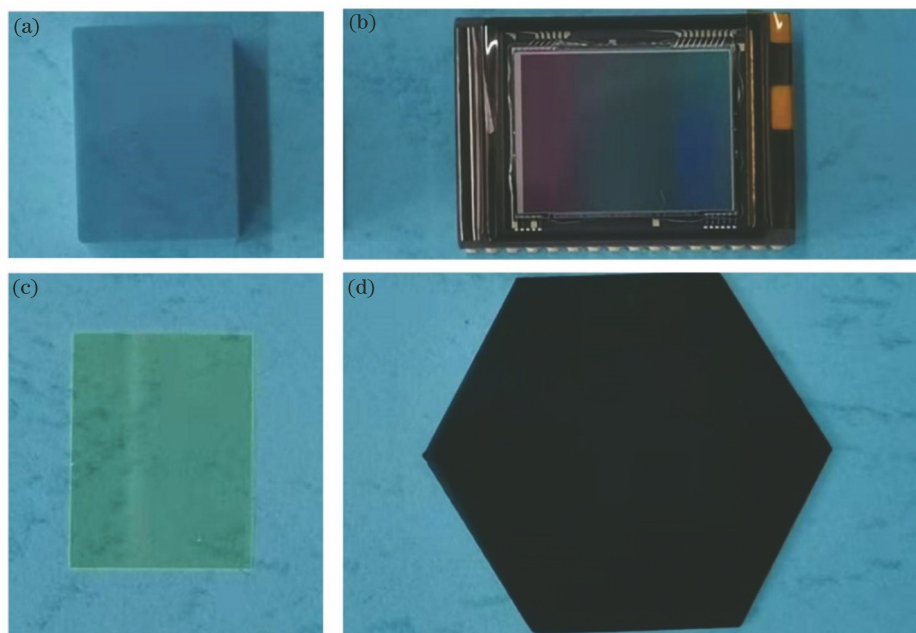


图 8 CCD 探测器的主要组件。(a)  $NA=1$  的光纤面板;(b) KAF-8300 图像传感器;(c) GAGG\_Ce 闪烁体;  
(d)  $NA=0.2$  的光纤面板

Fig. 8 Main components of CCD detector. (a) Fiber optic panel with  $NA=1$ ; (b) KAF-8300 image sensor;  
(c) GAGG\_Ce scintillator; (d) optical panel with  $NA=0.2$

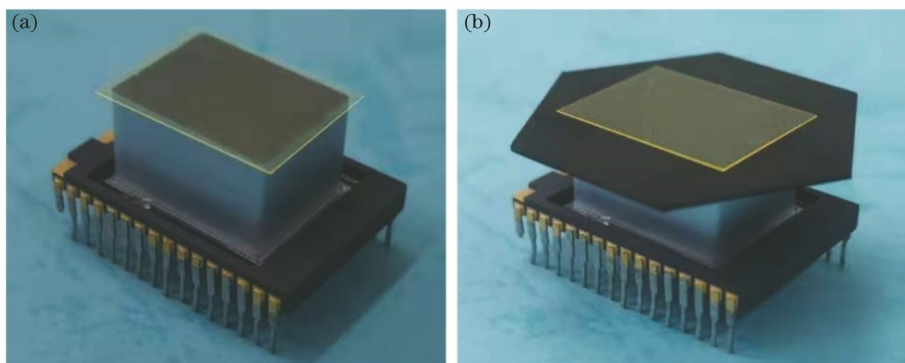


图 9 组件耦合实物图。(a)增加低数值孔径光纤前;(b)增加低数值孔径光纤后

Fig. 9 Physical image of component coupling. (a) Before adding low numerical aperture fiber;  
(b) after adding low numerical aperture fiber

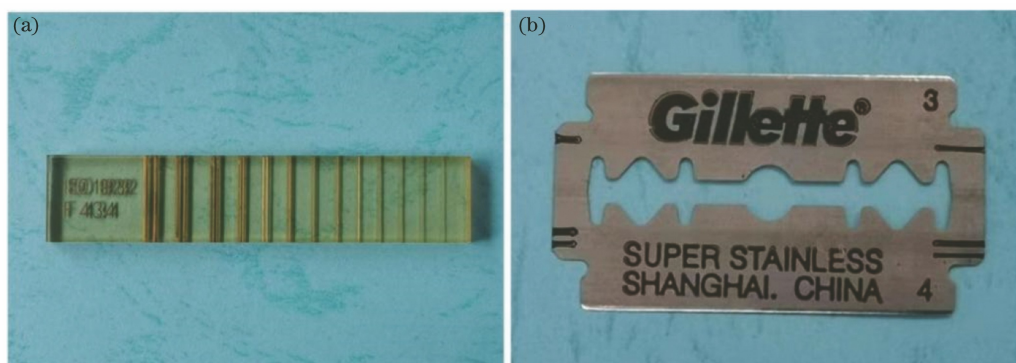


图 10 空间分辨率测试样件实物图。(a)双丝像质计;(b)剃须刀片

Fig. 10 Physical image of spatial resolution test sample. (a) Double-filament image quality indicator; (b) razor blade

图 11(a)显示了双丝像质计的 D11~D13 丝对。对矩形框中丝对的灰度曲线进行统计后,可计算出探测器系统的调制传递函数<sup>[23]</sup>

$$f_{\text{MTF}} = \frac{d}{B} \times 100\%, \quad (10)$$

式中: $d$  为丝对灰度与丝对间空气灰度的差值; $B$  为丝对灰度与背景灰度的差值。通过对区域内多条灰度变化曲线求平均后,可得到双丝像质计的灰度变

换曲线,如图 11(b)所示。可以看出,最高分辨率(10 lp/mm)丝对 D13 的调制度为 56%。当增加低数值孔径光纤约束时,在探测器曝光 60 s 后得到的双丝像质计的 D11~D13 丝对投影图如 11(c)所示。图 11(d)为相应的丝对灰度变换曲线统计结果,其最高分辨率丝对 D13 的调制度可提高至 84%,空间分辨率提升效果明显。

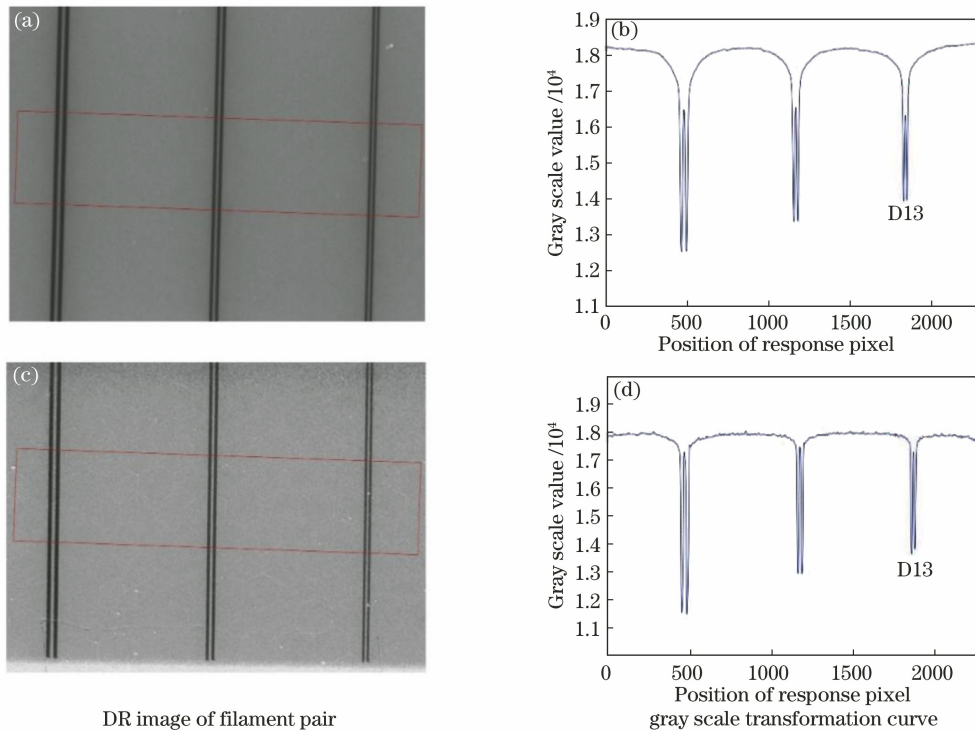


图 11 双丝像质计法测量空间分辨率的结果。(a)(b)增加低数值孔径光纤前;(c)(d)增加低数值孔径光纤后  
Fig. 11 Spatial resolution results measured by double-filament image quality indicator method.  
(a)(b) Before adding low numerical aperture fiber; (c)(d) after adding low numerical aperture fiber

对于辐射成像而言,相关的标准认定调制度达到 20%时的线对卡分辨率为探测器的空间分辨率<sup>[24]</sup>。由于图 11 中两种情况下的调制度均远高于 20%,因此为测定探测器空间分辨率的实际值,利用刀口法<sup>[25]</sup>对探测器空间分辨率进行进一步测试,测试结果如图 12(a)与图 12(c)所示。应用 ImageJ 软件的 SE MTF 2xNyquist 插件对刀片投影图像进行处理,计算绘制刀口边缘区域(正方形框)的调制传递函数曲线如图 12(b)与图 12(d)所示。可以看出,增加低数值孔径光纤面板前,探测器空间分辨率为 17 lp/mm;增加低数值孔径光纤面板后,探测器空间分辨率可达到 62 lp/mm。

在实验中,应用管电压为 90 kV 的连续谱 X 射线进行 DR 测试,通常认为其等效单能 X 射线的能量为管电压的 1/3~1/2。因此,取图 6(a)、(c)中

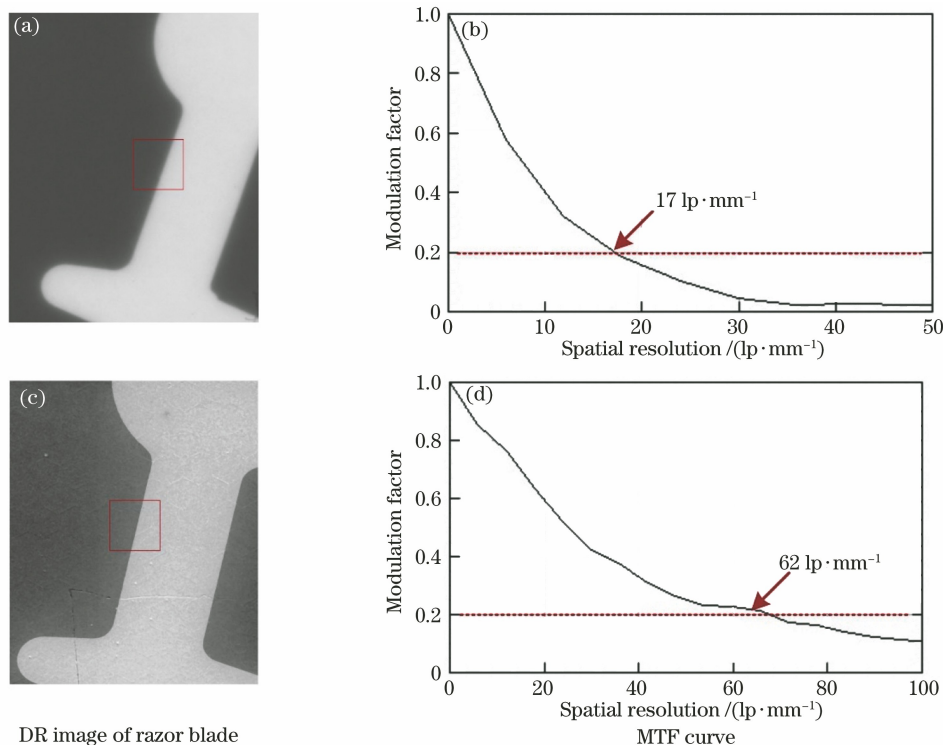
40 keV 仿真实验结果与实际实验结果进行对比,如表 6 所示。

表 6 仿真与实验得到的空间分辨率结果对比  
Table 6 Comparison of spatial resolution results obtained by simulation and experiment

NA	Spatial resolution / (lp·mm <sup>-1</sup> )	
	Simulation	Experiment
1.0	25	17
0.2	50	62

通过仿真与实验结果对比可知,增加低数值孔径光纤后,探测器空间分辨率显著提高。此外,当 NA=1.0 时,CCD 探测器空间分辨率的实验值略低于仿真结果,可能是耦合剂的实际厚度大于仿真厚度和光纤串扰等原因造成的。当 NA=0.2 时,CCD





DR image of razor blade

图 12 刀口法测试空间分辨率的结果。(a)(b)未增加低数值孔径光纤前;(c)(d)增加低数值孔径光纤后  
Fig. 12 Spatial resolution results measured by knife-edge method. (a)(b) Before adding low numerical aperture fiber;  
(c)(d) after adding low numerical aperture fiber

探测器空间分辨率的实验值略高于仿真结果,出现该现象的原因:1)加工原因使得低数值孔径光纤的实际数值孔径值低于 0.2;2)图像传感器 KAF-8300 的像元尺寸小于仿真像元。

在实验测试中,为获得与增加低数值孔径光纤前接近的投影数据值,将低数值孔径光纤后的积分时间增大了 30 倍,即积分时间设置为 60 s。对比表 5 的仿真结果可知,增加低数值孔径光纤后 X 射线转换因子降低为原来的 1/21,即理论上积分时间增加了 21 倍。由此可见,增加低数值孔径光纤后,探测器 X 射线转换因子会降低。此外,X 射线转换因子实验测试结果略高于仿真,该现象是仿真中的近似与耦合偏差导致的。综上所述,虽然降低光纤面板的数值孔径能有效提高 CCD 探测器的空间分辨率,但是造成探测器荧光转换因子的降低。

## 5 结 论

通过理论与仿真研究发现,在低能 X 射线辐射成像应用中,荧光串扰是影响光纤耦合单晶闪烁屏型 CCD/CMOS 探测器空间分辨率的主要因素,并且抑制荧光串扰可提高探测器的空间分辨率。利用降低光纤面板数值孔径屏蔽 CCD/CMOS 对入射角度过大的荧光的接收来抑制荧光串扰,进而提高探

测器空间分辨率,并据此开展了仿真与实验研究。结果表明,通过降低光纤面板数值孔径能有效提高 CCD/CMOS 探测器的空间分辨率,但同时会降低 X 射线的探测效率。因此,在实际应用中,应综合考虑 CCD/CMOS 探测器的空间分辨率与探测效率需求,选取合适的光纤面板数值孔径与闪烁屏厚度匹配。

## 参 考 文 献

- [1] Chen G, Luo S H, Dong G, et al. System design and experimental study of a new micro-CT [J]. *China Medical Devices*, 2009, 24(4): 60-62, 99. 陈功, 罗守华, 董歌, 等. 一种新的显微 CT 系统设计与实验研究[J]. *中国医疗设备*, 2009, 24(4): 60-62, 99.
- [2] Wang X, Tu S J, Liu X, et al. Research progress and prospect of three-dimensional super-resolution microscopy imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22): 2200003. 王潇, 涂世杰, 刘鑫, 等. 三维超分辨显微成像技术的研究进展及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(22): 2200003.
- [3] Yang J, Hou H S, Fu W, et al. 3D microscopic CT imaging and significance of SK-2 deep mudstone of Shahezi group [J]. *Geological Bulletin of China*,

- 2020, 39(7): 1006-1014.  
杨璠, 侯贺晟, 符伟, 等. 松科二井深层沙河子组泥岩三维显微 CT 成像及对深部油气预测的启示[J]. 地质通报, 2020, 39(7): 1006-1014.
- [4] Tan H, Wang D D, Xue Y L, et al. Parallelization of 3D thinning algorithm for extracting skeleton of micro-CT vasculature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1117003.  
谭海, 王大东, 薛艳玲, 等. 显微 CT 血管系统三维结构的骨架细化算法并行化设计实现[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1117003.
- [5] Gong J W, Chen B. The core components of indirect X-ray detectors and their coupling methods[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, [2021-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210712.1607.008.html>.  
龚建伟, 陈兵. 间接式 X 射线探测器的核心器件及其耦合方式[J/OL]. 激光与光电子学进展, [2021-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210712.1607.008.html>.
- [6] Wei B, Zhou M, Feng P, et al. Study on CsI(Tl) scintillating crystal for X-ray high-resolution detection with Monte Carlo method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1429-1434.  
魏彪, 周密, 冯鹏, 等. X 光高分辨探测用 CsI(Tl) 晶体的蒙特卡罗模拟研究[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1429-1434.
- [7] Xu X Y, Niu H B. The fluorescence escape efficiency of CsI:Na(CsI:Tl) and its converting factor to X-rays[J]. *Chinese Journal of Computation Physics*, 2002, 19(3): 195-202.  
徐向晏, 牛憨笨. CsI:Na(CsI:Tl) 荧光透过率和对 X 射线的转换因子[J]. 计算物理, 2002, 19(3): 195-202.
- [8] Wang J, Su M, Yang Z H, et al. Soft X-ray energy corresponding of CsI(Tl) scintillator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(12): 122006.  
王静, 苏明, 杨祖华, 等. CsI(Tl) 闪烁体软 X 光能量响应的模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(12): 122006.
- [9] 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.  
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.
- [10] Yanagida T, Kamada K, Fujimoto Y, et al. Comparative study of ceramic and single crystal Ce:GAGG scintillator[J]. *Optical Materials*, 2013, 35(12): 2480-2485.
- [11] Park C, Kim C, Kim J, et al. Performance comparison between ceramic Ce:GAGG and single crystal Ce:GAGG with digital-SiPM[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12(1): P01002.
- [12] Drozdowski W, Witkowski M E, Solarz P, et al. Scintillation properties of  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12} : Ce$  (GAGG:Ce) comparison between monocrystalline and nanoceramic samples[J]. *Optical Materials*, 2018, 79: 227-231.
- [13] Zhou R F, Wang J, Han Z. Scattered correction in industrial X-ray computerized tomography[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2006, 40(4): 450-452.  
周日峰, 王珏, 韩忠. X 射线工业 CT 散射修正[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(4): 450-452.
- [14] Zhou R F, Yin Y F, Li F K, et al. Research on electron beam deflection system of multi-focus X-ray source for small-size stationary CT[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(11): 2072-2077.  
周日峰, 殷一帆, 李富坤, 等. 小型静态 CT 用多焦点 X 射线源电子束偏转系统研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(11): 2072-2077.
- [15] Yang T Y, Yu G M, Yang X L, et al. Method for crosstalk image restoration of linear array detector based on RC model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2304001.  
杨天远, 余恭敏, 杨小乐, 等. 基于 RC 模型的线阵探测器串扰图像复原方法[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2304001.
- [16] Wang Y, Liu D F, Xu Q F, et al. Measurement and simulation of optical crosstalk of infrared detector modules[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0404001.  
汪洋, 刘大福, 徐勤飞, 等. 红外探测器组件的光串测试及模拟[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0404001.
- [17] Shao J M, Lu H N, Cai H. A point spread function model for X-ray imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1148-1152.  
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.
- [18] Salvat F, Llovet X. Monte Carlo simulation and fundamental quantities[J]. *IOP Conference Series*, 2018, 304: 012014.
- [19] Faddegon B A, Kawrakow I, Kubyshev Y, et al. The accuracy of EGSnrc, Geant4 and PENELOPE Monte Carlo systems for the simulation of electron scatter in external beam radiotherapy[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2009, 54(20): 6151-6163.
- [20] Nagdive A, Dongre M, Makkar R. Design and simulation of NIR spectrometer using Zemax[C]//

- 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), March 17-18, 2017, Coimbatore, India. New York: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [21] Yao S, Zhang H M, Liu Y Q, et al. Design and experimental study of the high uniformity semiconductor linear laser light source [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 1105: 225-232.
- [22] Li Y L, Li Y J, Wang S F, et al. Design of solid-state detector module for high-energy X-ray imaging system[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2003(12): 1594-1596, 1612.  
李玉兰, 李元景, 王少锋, 等. 高能 X 射线成像系统固体探测器模块的设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003(12): 1594-1596, 1612.
- [23] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: non-destructive testing: image quality of radiographs: part 5: determination of the image quality unsharpness and basic spatial resolution value using duplex wire-type image quality indicators. GB/T 23901.5—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.  
国家市场监督管理总局, 中国国家标准化委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 无损检测 射线照相检测图像质量 第 5 部分: 双丝型像质计图像不清晰度的测定 GB/T 23901.5—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [24] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: non-destructive testing: test method for measurement of industrial computed tomography (CT) system performance. GB/T 29069—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 无损检测 工业计算机层析成像(CT)系统性能测试方法 GB/T 29069—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [25] Zhang X L, Du G H, Deng B, et al. High precision measurement of modulation transfer function for X-ray CCD with knife-edge method [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1680-1687.  
张晓琳, 杜国浩, 邓彪, 等. 刀口法高精度测量 X 射线 CCD 调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1680-1687.