

光学学报

基于全反射抑制串扰的双层结构高分辨闪烁屏

安康^{1,2}, 李汶芳^{1,2}, 段晓礁^{1,2}, 杜宇³, 周日峰^{1,2}, 王珏^{1,2*}

¹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;

²工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044;

³中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621000

摘要 在低能 X 射线成像中, 荧光串扰是影响光纤耦合电荷耦合器件 (CCD)/互补金属氧化物半导体 (CMOS) 型高分辨平板探测器空间分辨率的主要因素。基于界面全反射对荧光串扰的抑制作用, 提出一种双层结构高分辨闪烁屏。双层闪烁屏间通过低折射率耦合介质耦合, 调节耦合介质折射率可控制上层闪烁屏与耦合介质界面间可输出的荧光角度, 达到抑制荧光串扰、提升闪烁屏探测空间分辨率的目的。基于点扩散函数理论的仿真结果表明, 与同等厚度的单层闪烁屏相比, 所提双层结构闪烁屏可实现更高的空间分辨率。X 射线成像实验结果进一步验证了应用双层结构闪烁屏对提升探测器空间分辨率的有效性。

关键词 成像系统; 双层结构; 荧光串扰; 折射率; 空间分辨率; GAGG:Ce

中图分类号 O434.19

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2211004

High-Resolution Scintillation Screen with Double-Layer Structure Based on Crosstalk Suppression by Interface Total Reflection

An Kang^{1,2}, Li Wenfang^{1,2}, Duan Xiaojiao^{1,2}, Du Yu³, Zhou Rifeng^{1,2}, Wang Jue^{1,2*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²Industrial CT Non-destructive Testing Engineering Research Center of Ministry of Education, Chongqing 400044, China;

³Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, Sichuan, China

Abstract In low-energy X-ray imaging, fluorescence crosstalk is the most important factor affecting the spatial resolution of fiber-coupled high-resolution charge-coupled device (CCD)/complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) flat-panel detectors. In this paper, a high-resolution scintillation screen with a double-layer structure is proposed on the basis of the suppression effect of interface total reflection on fluorescence crosstalk. The two scintillation layers are coupled by a coupling medium with a small refractive index. The refractive index of the coupling medium can be adjusted to control the output angle of fluorescence on the interface between the upper scintillation screen and the coupling medium, thereby achieving the purpose of suppressing fluorescence crosstalk and improving the spatial resolution detected by scintillation screen. The simulation results based on the point spread function theory show that compared with the single-layer scintillation screen with the same thickness, the proposed scintillation screen with a double-layer structure can achieve higher spatial resolution. The experimental results of X-ray imaging further verify the effectiveness of the proposed scintillation screen in improving the spatial resolution of the detector.

Key words imaging systems; double-layer structure; fluorescence crosstalk; refractive index; spatial resolution; GAGG:Ce

收稿日期: 2022-03-15; 修回日期: 2022-05-11; 录用日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12175026)、重庆市技术创新与应用发展项目(cstc2021ycjh-bgzxm0222)、中央高校基本科研业务费项目(2022CDJXY-023)

通信作者: *wangjue@cqu.edu.cn

1 引言

微焦计算机断层扫描(Micro-CT)系统是具有高扫描效率、高空间分辨率的无损检测设备,可实现对待检物体内部结构微米级分辨率的三维成像^[1],被广泛应用于生物医学研究^[2]、仪器仪表工业^[3]和矿物岩石检测^[4]等领域中。光纤耦合电荷耦合器件(CCD)/互补金属氧化物半导体(CMOS)型 X 射线平板探测器由闪烁屏、光纤面板/光锥和具有微米级像元的 CCD/CMOS 图像传感器耦合制成^[5],具有很高的理论空间分辨率,在实验室 Micro-CT 系统中得到了广泛的应用。然而,由于像元间信号串扰的存在,光纤耦合 CCD/CMOS 型 X 射线平板探测器的实际空间分辨率与理论空间分辨率之间存在巨大的差距,故如何抑制信号串扰、提升探测器空间分辨率一直是辐射探测器研制领域中的研究热点。

平板探测器像元间的信号串扰包括射线散射串扰和荧光串扰两类^[6],研究发现在低能 X 射线成像应用中荧光串扰是影响探测器空间分辨率的主要因素^[7]。围绕荧光串扰抑制问题,研究人员已经进行了大量的研究,常用的抑制方法主要有两类。第一类方法是通过设置屏蔽壁,制作具有独立像元结构的闪烁屏。Chen 等^[8]对具有独立像元结构的闪烁屏的空间分辨率进行了仿真研究,得到了在光子能量为 10~80 keV 的 X 射线照射下,像元尺寸为 10~60 μm 的闪烁屏的空间分辨率。Tabata 等^[9-10]通过微加工技术制作了间距为 100 μm 的小像素微孔阵列硅衬底,在微孔内生长 CsI(Tl)柱状晶体制备了独立像元结构的 400 μm 厚闪烁屏,与普通 CsI(Tl)闪烁屏相比,空间分辨率为 5 lp/mm 时的调制传递函数(MTF)由 10% 提升至 42%。Liu 等^[11]进一步研究了不同形式排列的孔阵列硅衬底对空间分辨率的影响,利用微加工技术制作了孔径更小、空间分辨率更高的六边形排列的孔阵列闪烁屏。然而,随着闪烁屏厚度的增加或孔径的减小,高分辨硅衬底孔阵列的加工难度会不断增大直至无法实现,且制作成本剧增,不利于大面积推广应用。第二类方法是减小闪烁屏的厚度。德国 Proxitronic 公司利用 50 μm 厚的 GOS 陶瓷闪烁屏^[12]实现了 11 lp/mm 的空间分辨率(以下除特别说明外,空间分辨率指标均为 MTF 为 10% 时的指标)。英国 ANDOR 公司利用 40 μm 厚的 YAG:Ce 和 LuAG:Ce^[13]单晶闪烁屏实现了 15 lp/mm 的空间分辨率。然而,减小闪烁屏厚度在提高分辨率的同时会降低闪烁屏上 X 射线的能量沉积,导致 X 射线探测效率降低。

本文针对光纤耦合 CCD/CMOS 型高分辨 X 射线探测器进行研究,根据闪烁屏与耦合介质界面的全反射效应,设计了一种双层结构高分辨闪烁屏。调节耦合介质的折射率来控制上层闪烁屏的可输出荧光角度,实现对上、下层闪烁屏荧光串扰的针对抑制,在不改变闪烁屏厚度和保障 X 射线探测效率的前提下,提高探测器的空间分辨率。

2 双层结构闪烁屏

2.1 闪烁屏信号串扰

在理想情况下,闪烁屏吸收 X 射线后产生的荧光被其对应的 CCD/CMOS 像元完全吸收,CCD/CMOS 的探测分辨率即为光纤耦合 CCD/CMOS 型 X 射线探测器的探测分辨率。然而,受到 X 射线散射与荧光各向传播的影响,部分 X 射线或荧光能量会被其他 CCD/CMOS 像元吸收而形成信号串扰^[14],导致探测器空间分辨率降低。X 射线散射串扰是入射 X 光子与闪烁屏粒子发生康普顿散射^[15-16],使得 X 光子的运动方向偏离原来入射的方向引起的串扰现象。荧光串扰是闪烁屏吸收入射 X 射线的能量后受激发出荧光,而荧光各向同性传播所引起的。由于串扰的存在,故 CCD/CMOS 对单点入射闪烁屏的 X 射线能量的点扩散吸收分布为

$$I_{\text{PSF}} = \sum_{k=1}^H [B_k(m, n) * A(i, j, k)], \quad (1)$$

式中: (i, j, k) 为闪烁屏的体素坐标; H 为闪烁屏层数; $A(i, j, k)$ 为闪烁屏 (i, j, k) 位置处的 X 射线沉积量; $B_k(m, n)$ 为 CCD/CMOS 对闪烁屏的第 k 层位置中心体素所产生的荧光的吸收分布;*为卷积运算。闪烁屏的信号串扰直接决定了探测器的空间分辨率,将点扩散吸收分布进行傅里叶变换,即可得到探测器的 MTF 曲线

$$f_{\text{MTF}} = \mathcal{F}(I_{\text{PSF}}), \quad (2)$$

式中: $\mathcal{F}(\cdot)$ 为傅里叶变换。

2.2 荧光传输的界面效应

本文针对新型掺铈钆铝镓石榴石(GAGG:Ce)单晶闪烁屏的 X 射线成像进行研究,GAGG:Ce 闪烁屏折射率为 1.91^[17],而常规光学耦合剂的折射率一般在 1.3~1.6 之间,低于 GAGG:Ce 闪烁屏的折射率。当闪烁屏荧光由光密介质 GAGG:Ce 入射到光疏介质耦合剂时,荧光在 GAGG:Ce 闪烁屏与耦合剂界面上会发生全反射现象^[18]。调节耦合剂折射率可改变全反射的临界角度,耦合剂的折射率越低,则全反射的临界角度越小,越有利于减小闪烁屏荧光的串扰范围。

2.3 双层结构闪烁屏

根据朗伯-比尔定律^[19]

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (3)$$

式中: I_0 为入射 X 射线的强度; μ 为闪烁屏对 X 射线的线性衰减系数; d 为 X 射线穿透闪烁屏的路径长度; I 为穿过闪烁屏后透射的 X 射线强度。由式(3)可知,在 X 射线穿透闪烁屏后,闪烁屏不同位置的射线能量沉积率与 X 射线穿透闪烁屏的路径长度有关,越靠近 X 射线入射面的位置处,能量沉积率越高、荧光强度越大。

如图 1 所示,受输出面全反射的限制,闪烁屏荧光能到达光纤面板/光锥的最大输出角度处,越靠近 X 射线入射面的位置,产生的荧光串扰范围越大。选用低折射率的耦合剂耦合闪烁屏与光纤面板/光锥,

会造成闪烁屏靠近光纤面板/光锥位置处产生的荧光的输出效率降低;选用高折射率耦合剂耦合闪烁屏与光纤面板/光锥,会导致闪烁屏远离光纤面板/光锥位置处产生的荧光串扰的范围过大。基于此,本文提出一种由两层闪烁屏耦合而成的双层结构高分辨闪烁屏,两层闪烁屏间由空气或低折射率的耦合剂作为耦合介质,通过调节耦合介质折射率来控制

闪烁屏的可输出荧光角度,进而实现对上、下层闪烁屏荧光串扰的针对抑制。双层结构闪烁屏的原理如图 2 所示,其中 a_1 和 a_2 为两层闪烁屏输出荧光的全反射角。下层闪烁屏应用折射率为 n_1 的耦合剂与光纤耦合,上层与下层闪烁屏应用折射率为 n_2 的耦合剂耦合,为控制荧光串扰范围,耦合介质折射率应满足 $n_2 < n_1$ 。

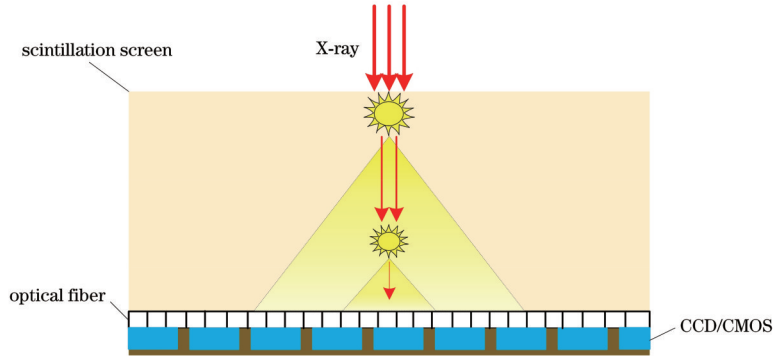


图 1 荧光串扰分析

Fig. 1 Analysis of fluorescence crosstalk

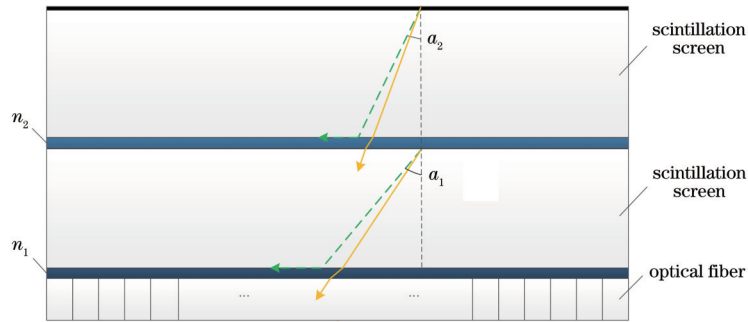


图 2 双层结构闪烁屏

Fig. 2 Scintillation screen with double-layer structure

3 探测器空间分辨率仿真

3.1 仿真模型

采用蒙特卡罗模拟程序 EGSnrc 和 GAGG:Ce 闪烁屏参数建立仿真模型,仿真计算闪烁屏不同位置处的 X 射线吸收分布。仿真模型闪烁屏的厚度设置为 $200 \mu\text{m}$,划分为 20 个分层,体素大小为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,入射 X 射线的光子能量设置为 40 keV 。仿真得到的闪烁屏的各分层中心体素能量沉积率如表 1 所示。

选用 Zemax 软件中 Zemax OpticStudio 模块进行闪烁屏荧光探测仿真^[20],依据表 1 中闪烁屏各层的 X 射线能量沉积率数值设置仿真实验发光体素的功率,以全帧 CCD KAF-16803 作为探测器建立荧光探测模型。单层和双层结构闪烁屏 Zemax 仿真模型如图 3 所示,仿真参数如表 2 所示。根据闪烁屏的 X 射线入射面有抛光后添加反光层、抛光后添加吸光层和仅抛光三种处理方法,分别设置仿真模型中闪烁屏的 X 射线入射面分别为反光层、吸光层和仅进行抛光处理:闪烁

表 1 40 keV X 射线入射时闪烁屏的各分层中心体素能量沉积率

Table 1 Energy deposition rate of center voxel in each layer of scintillation screen at 40 keV X-ray incidence

Scintillation layer	Absorbed dose /Gy	Scintillation layer	Absorbed dose /Gy
1	3.53	11	2.47
2	3.46	12	2.36
3	3.39	13	2.27
4	3.26	14	2.17
5	3.14	15	2.10
6	3.00	16	2.01
7	2.89	17	1.93
8	2.78	18	1.85
9	2.66	19	1.78
10	2.56	20	1.71

屏添加反光层的探测器荧光吸收效率最高,但空间分辨率低;闪烁屏添加吸光层的探测器空间分辨率最高,

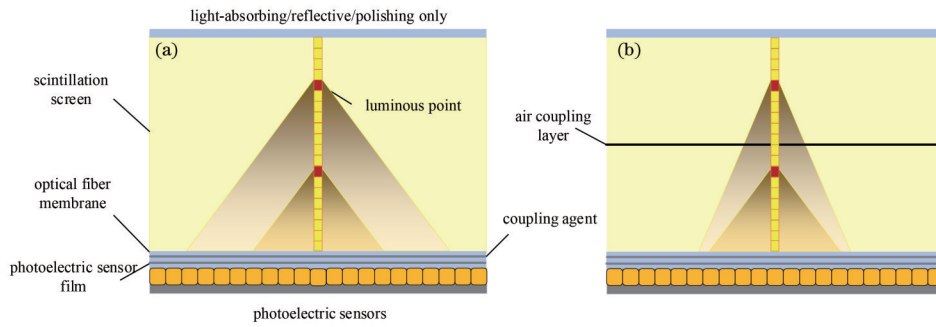


图 3 荧光探测仿真模型。(a)单层闪烁屏仿真模型;(b)双层结构闪烁屏仿真模型

Fig. 3 Simulation models of fluorescence detection. (a) simulation model of single-layer scintillation screen; (b) simulation model of double-layer scintillation screen

表 2 荧光探测仿真主要参数

Table 2 Main parameters for fluorescence detection simulation

Parameter	Description in single layer model	Description in double layer model
Size of luminous body / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	10×10×10	10×10×10
Size of scintillator / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	2000×2000×200	2000×2000×100
Power of luminous body	Referring to values of absorbed dose in Table 1 for equal proportion setting	Referring to values of absorbed dose in Table 1 for equal proportion setting
Refractive index of GAGG_Ce	1.91	1.91
Refractive index of coupling agent	1.43	1.43, 1.00
Thickness of coupling agent / μm	2	2
Numerical aperture of optical fiber	1.43	1.43
Number of particles tracked	1×10 ⁷	1×10 ⁷

但荧光吸收效率低;闪烁屏仅抛光处理的探测器荧光吸收效率与空间分辨率适中。

3.2 仿真结果

在应用 Zemax 软件仿真得到不同参数设置下 CCD 的点扩散吸收分布后,利用傅里叶变换分别计算 MTF 曲线,结果如图 4 所示。图 4(a)是闪烁屏 X 射线入射面为反光层的探测器的空间分辨率的仿真结果。可以发现:应用单层结构闪烁层的探测器的空间分辨率约为 5.8 lp/mm;应用双层结构闪烁屏的探测器的

空间分辨率提升为约 8.9 lp/mm。图 4(b)是闪烁屏 X 射线入射面为吸光层的探测器的空间分辨率的仿真结果。可以发现:应用单层闪烁屏的探测器的空间分辨率约为 10.9 lp/mm;应用双层结构闪烁屏的探测器的空间分辨率提升为约 12.4 lp/mm。图 4(c)是闪烁屏 X 射线入射面仅进行抛光处理的探测器的空间分辨率的仿真结果。可以发现:应用单层闪烁屏的探测器的空间分辨率约为 6.9 lp/mm;应用双层结构闪烁屏的探测器的空间分辨率提升为约 11.9 lp/mm。

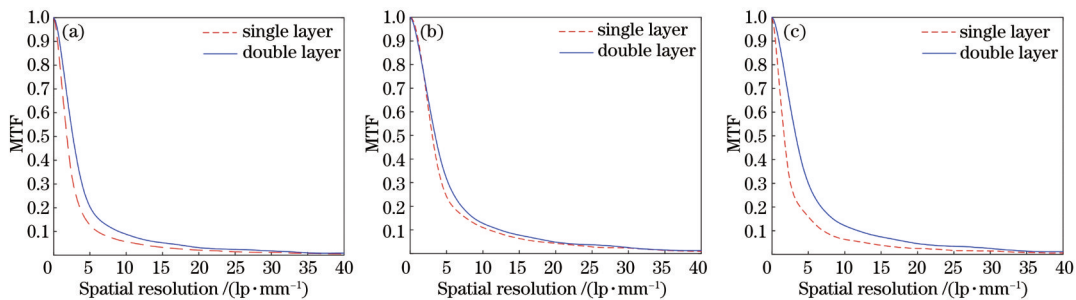


图 4 探测器空间分辨率仿真结果。(a)闪烁屏的 X 射线入射面为反光层;(b)闪烁屏的 X 射线入射面为吸光层;(c)闪烁屏的 X 射线入射面仅进行抛光处理

Fig. 4 Simulation results of spatial resolution of detector. (a) X-ray incident plane of scintillation screen is reflective layer; (b) X-ray incident plane of scintillation screen is light-absorbing layer; (c) X-ray incident plane of scintillation screen is polishing only

从仿真结果可以看出,所设计的双层结构闪烁屏在闪烁屏X射线入射面采用不同的处理方式时,均能实现探测空间分辨率的提升。

3.3 空气耦合层厚度的影响分析

双层结构闪烁屏的耦合层厚度较难控制,为进一步研究空气耦合层厚度对空间分辨率的影响,采用图4(c)所用的仿真模型,改变空气耦合层厚度进行仿真。仿真结果如图5所示。可以发现,当耦合层厚度在2~10 μm 范围内时,厚度变化对空间分辨率的影响较小。

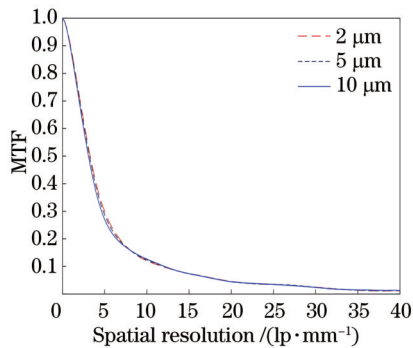


图5 耦合介质厚度对探测器空间分辨率的影响

Fig. 5 Influence of coupling medium thickness on spatial resolution of detector

4 实验验证与结果分析

为验证仿真实验结果,搭建了如图6所示的X射线成像测试平台。采用日本HAMAMATSU闭管微焦点X射线源L10321,其管电压为40~100 kV,焦点

尺寸为5~30 μm (功率为4 W时,焦点尺寸为5 μm)。采用像元尺寸为9 $\mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 的全帧CCD图像传感器KAF-16803耦合5 mm厚的数值孔径为1的光纤面板制作探测器。耦合剂采用道康宁184硅橡胶,其折射率为1.43。

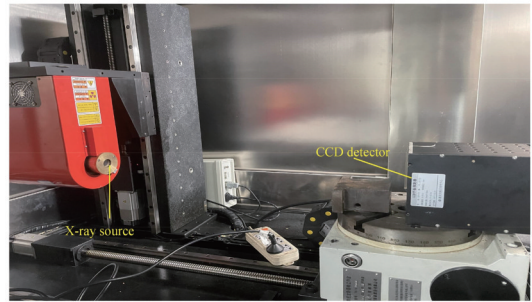


图6 X射线成像测试平台

Fig. 6 X-ray imaging test platform

图7展示了CCD探测器及其组成部件的实物图。本文实验自制探测器闪烁屏的X射线入射面仅进行了抛光处理,这样便于观察双层闪烁屏间的耦合情况。图7(a)~(c)分别为中国电子科技集团公司第二十六研究所制作的厚度为200、100、100 μm 的GAGG_Ce单晶闪烁屏,采用千分尺测得闪烁屏各区域厚度存在最大 $\pm 5 \mu\text{m}$ 的偏差。图7(d)为将200 μm 厚闪烁屏耦合到光纤面板上的单层闪烁屏探测器。图7(e)为将两片100 μm 厚的闪烁屏空气耦合后,通过耦合剂与光纤面板耦合制成的双层结构闪烁屏探测器。图7(f)为用于测试空间分辨率的双丝像质计。

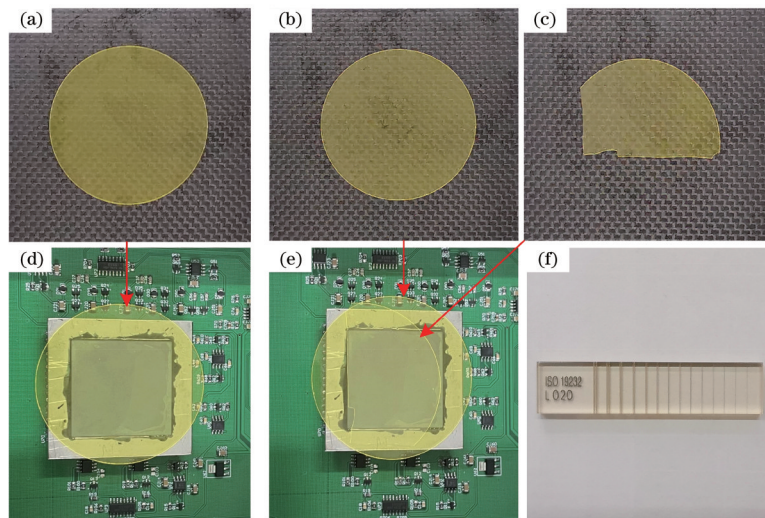


图7 测试组件与探测器。(a) 200 μm 厚的闪烁屏;(b) 100 μm 厚的闪烁屏;(c) 100 μm 厚的闪烁屏;(d)由图7(a)中闪烁屏构成的探测器;(e)由图7(b)和图7(c)中闪烁屏构成的探测器;(f)双丝像质计

Fig. 7 Test components and detector. (a) scintillation screen with thickness of 200 μm ; (b) scintillation screen with thickness of 100 μm ; (c) scintillation screen with thickness of 100 μm ; (d) detector made of scintillation screen in Fig. 7(a); (e) detector made of scintillation screens in Fig. 7(b) and Fig. 7(c); (f) duplex wire image quality indicator

采用图7所示的实验平台,将双丝像质计紧贴X射线探测器探测窗口放置,射线源管电压设置为70 kV,管电流设置为300 μA ,射线源焦点至探测器的

距离设置为500 mm,探测器积分时间设置为2 s,得到的双丝像质计数字射线投影(DR)图像如图8所示。

图8(a)、(c)分别为应用双层结构闪烁屏、单层闪

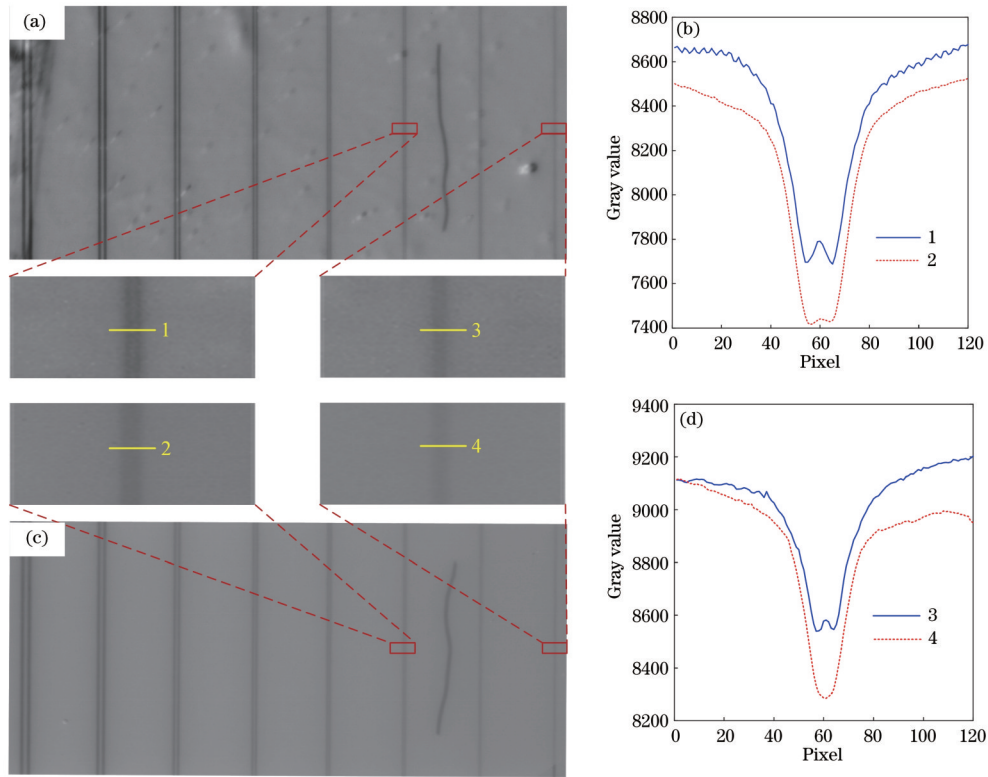


图 8 双丝像质计成像测试结果。(a)应用双层结构闪烁屏测得的 DR 图像;(b) D13 丝对灰度值对比图;(c)应用单层闪烁屏测得的 DR 图像;(d) D15 丝对灰度值对比图

Fig. 8 Imaging test results of duplex wire image quality indicator. (a) DR image measured by scintillation screen with double-layer structure; (b) gray value comparison curves of D13 wire pair; (c) DR image measured by single-layer scintillation screen; (d) gray value comparison curves of D15 wire pair

烁屏测得的 D8~D15 丝对 DR 图像,放大 DR 图中 D13 (空间分辨率为 10 lp/mm)丝对和 D15(空间分辨率为 15 lp/mm)丝对局域图。对比可见,应用双层结构闪烁屏测得的 DR 图像丝对清晰度优于应用单层闪烁屏测得的图像。为更加直观地显示图像分辨率,绘制放大图中线 1~4 的灰度曲线,并结合灰度对比度(调制度)进行比较,丝对的灰度对比度计算公式^[21]为

$$F_{MT} = \frac{A + B - 2C}{A + B} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:A、B 分别为双丝灰度与空气灰度的差值;C 为双丝间缝隙中的灰度与空气灰度的差值。

图 8(b)为 D13 丝对的灰度曲线,线 1 为应用双层结构闪烁屏得到的测试结果,线 2 为应用单层闪烁屏得到的测试结果。可以发现:线 1 能更加明显地分辨出双丝间的灰度差异;进一步由式(4)可计算得到线 1 的 MTF 为 9.6%,而线 2 的 MTF 仅为 1.8%。图 8(d)为 D15 丝对的灰度曲线,线 3 为应用双层结构闪烁屏得到的测试结果,线 4 为应用单层闪烁屏得到的测试结果。可以发现:线 3 仍能分辨出双丝间的灰度差异,而线 4 已无法区分;进一步可计算得到线 3 的 MTF 为 6.9%,而线 4 的 MTF 为 0。MTF 计算结果定量地证明了应用双层结构闪烁屏的探测器具有更高的空间分辨能力。通过各丝对 MTF 计算结果拟合得到的应用单层闪烁屏和双层结构闪烁屏的探测器的 MTF 曲线

如图 9 所示。

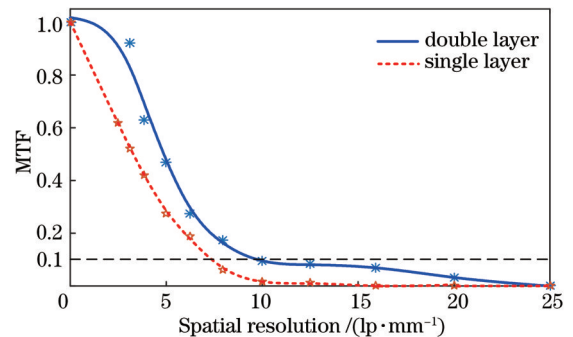


图 9 应用双层结构闪烁屏与单层闪烁屏的探测器的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves of detector using scintillation screen with double-layer structure and single-layer scintillation screen

由图 9 可知,应用单层闪烁屏、双层结构闪烁屏的探测器的空间分辨率分别为 7.3 lp/mm 和 9.8 lp/mm,即应用双层结构闪烁屏对探测器的空间分辨率提升效果明显。对比仿真实验与 DR 成像实验结果发现,空间分辨率测试结果存在一定差异,其主要原因有两个:一是仿真模型的闪烁屏参数和耦合参数均比较精确,而 DR 成像实验中存在加工、耦合偏差;二是仿真实验中应用的是 40 keV 单能 X 射线,而 DR

成像实验中应用的是微焦点 X 射线源(连续谱),其在闪烁屏上的能量沉积率分布与仿真实验存在差异。

5 结 论

光纤耦合 CCD/CMOS 型 X 射线探测器在高分辨微焦电子计算机断层扫描系统中得到了广泛应用。针对抑制闪烁屏荧光串扰、提升光纤耦合 CCD/CMOS 型 X 射线探测器空间分辨率展开研究,提出一种双层结构高分辨闪烁屏。基于点扩散函数理论的仿真实验表明,双层耦合 GAGG:Ce 闪烁屏可有效达到抑制荧光串扰目的,提升探测器的空间分辨率。双丝像质计的空间分辨率测试实验结果表明,当探测器应用 200 μm 厚的闪烁屏成像时,采用单层闪烁屏的空间分辨率可达到 7.3 lp/mm,而采用双层结构闪烁屏时的空间分辨率可提升至 9.8 lp/mm,空间分辨率提升了 34%,进一步验证了双层结构闪烁屏对提升探测器空间分辨率的有效性。

参 考 文 献

- [1] 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): 2200001.
Wang X, Tu S J, Liu X, et al. Advance and prospect for three-dimensional super-resolution microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2200001.
- [2] 吕寒玉,邹晶,赵金涛,等. 纳米计算机断层扫描成像技术进展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 140001.
Lü H Y, Zou J, Zhao J T, et al. Review on development of nano-computed tomography imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 140001.
- [3] 王正安,刘宾,华俊伟. 基于标样比对测试的固体火箭发动机工业 CT 检测工艺[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(4): 82-86.
Wang Z A, Liu B, Hua J W. Industrial CT detection technology of solid rocket motor based on standard sample comparison test[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(4): 82-86.
- [4] Gou Q Y, Xu S, Hao F, et al. Full-scale pores and micro-fractures characterization using FE-SEM, gas adsorption, nano-CT and micro-CT: a case study of the Silurian Longmaxi Formation shale in the Fuling area, Sichuan Basin, China[J]. Fuel, 2019, 253: 167-179.
- [5] Uesugi K, Hoshino M, Yagi N. Comparison of lens- and fiber-coupled CCD detectors for X-ray computed tomography[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2011, 18(2): 217-223.
- [6] 汪洋,刘大福,徐勤飞,等. 红外探测器组件的光串扰测试及模拟[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0404001.
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.
- [7] 安康,李汶芳,段晓礁,等. 光纤耦合 GAGG_Ce 型 X 射线探测器高分辨成像[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0111001.
An K, Li W F, Duan X J, et al. Fiber-coupled GAGG_Ce X-ray detector for high-resolution imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0111001.
- [8] Chen H, Gu M, Liu X, et al. Spatial resolution and light output of pixelated CsI(Tl) scintillation screen based on oxidized silicon micropore array template[J]. Journal of Instrumentation, 2018, 13(7): P07002.
- [9] Tabata K, Ohtake R, Koike A, et al. The high resolution scintillator type X-ray imaging detector with Si pixel collimator[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11369: 113690S.
- [10] Tabata K, Ohtake R, Aoki T. High-spatial-resolution X-ray imaging by scintillator in silicon collimator[J]. Sensors and Materials, 2020, 32(12): 4037-4045.
- [11] Liu S, Gu M, Chen H, et al. Performance of pixelated CsI scintillation screen with hexagonal array arrangement prepared by vacuum melting injection method[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 903: 18-24.
- [12] 陈启伟,施鹰,施剑林. 陶瓷闪烁材料最新研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(1): 128-132.
Chen Q W, Shi Y, Shi J L. The latest progress in ceramic scintillators research[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(1): 128-132.
- [13] 屈菁菁,李磊,伍晓莉,等. LuAG:Ce 和 LuAG:Ce, Mg 晶体生长与闪烁性能[J]. 压电与声光, 2019, 41(5): 670-672, 678.
Qu J J, Li L, Wu X L, et al. Growth and scintillation properties of LuAG:Ce crystal and LuAG:Ce, Mg crystal[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2019, 41(5): 670-672, 678.
- [14] 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.
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.
- [15] 王梦琪,曹良志,吴宏春,等. 闪光层析成像散射修正计算研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(11): 1382-1387.
Wang M Q, Cao L Z, Wu H C, et al. Study on scattering corrections in flash radiography[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(11): 1382-1387.
- [16] 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.
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.
- [17] Zhu Y, Qian S, Wang Z G, et al. Scintillation properties of GAGG:Ce ceramic and single crystal[J]. Optical Materials, 2020, 105: 109964.
- [18] 杨明太,张连平. 全反射 X 射线荧光分析[J]. 核电子学与探测技术, 2002, 22(6): 572-575.
Yang M T, Zhang L P. Total reflection X-ray

- fluorescence analysis[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002, 22(6): 572-575.
- [19] Yan C H, Whalen R T, Beaupré G S, et al. Reconstruction algorithm for polychromatic CT imaging: application to beam hardening correction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(1): 1-11.
- [20] Nagdive A, Dongre M, Makkar R. Design and simulation of NIR spectrometer using Zemax[C]// International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), March 17-18, 2017, Coimbatore, India. New York: IEEE Press, 2017.
- [21] 徐国珍. 无损检测射线照相检测图像质量第五部分: 双丝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.
- Xu G Z. Non-destructive testing radiographic testing image quality. Part V: measurement of image unsharpness with double-filament image quality indicator: GB/T 23901.5—2019[S]. Beijing: China Standard Press, 2019.