

激光与光电子学进展

间接式 X 射线探测器的核心器件及其耦合方式

龚建伟¹, 陈兵^{1,2*}

¹福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108;

²福州鑫图光电有限公司, 福建 福州 350026

摘要 间接式 X 射线探测器 (IXD) 的性能随着医学诊断、工业无损检测、安全监测以及科学研究等领域对成像要求的逐步提高而得到不断提升, 进而推动了低辐射剂量、高分辨率、快速实时 X 射线成像探测技术的进一步发展。闪烁屏和图像传感器作为 IXD 的核心器件, 伴随着闪烁体材料、半导体制造工艺和集成电路技术的进步得到了快速发展。为实现图像在闪烁屏和图像传感器间进行有效传输, 通常采取 3 种耦合方式: 光纤耦合、光学透镜耦合和直接耦合。本文主要介绍了闪烁屏和图像传感器的研究进展以及 3 种耦合方式的结构和特点, 并对 IXD 未来发展的趋势进行了展望。

关键词 X 射线光学; 间接式 X 射线探测器; 闪烁屏; 图像传感器; 光纤耦合; 光学透镜耦合; 直接耦合

中图分类号 TL816

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0700003

Core Devices and Coupling Modes of Indirect X-Ray Detectors

Gong Jianwei¹, Chen Bing^{1,2*}

¹School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

²Fuzhou Xintu Optoelectronics Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350026, China

Abstract The performance of indirect X-ray detector (IXD) has been improved with the gradual improvement of imaging requirements in medical diagnosis, industrial non-destructive testing, safety monitoring, and scientific research, which promotes the further development of low radiation dose, high resolution, and fast real-time X-ray imaging detection technology. As the core devices of IXD, scintillation screen and image sensor have developed rapidly with the progress of scintillator materials, semiconductor manufacturing process, and integrated circuit technology. In order to realize the effective transmission of image between scintillation screen and image sensor, three coupling modes are usually adopted: fiber coupling, optical lens coupling, and direct coupling. This paper mainly introduces the research progress of scintillation screen and image sensor, as well as the structure and characteristics of the three coupling modes, and prospects the future development trend of IXD.

Key words X-ray optics; indirect X-ray detector; scintillation screen; image sensor; fiber coupling; optical lens coupling; direct coupling

1 引 言

自德国物理学家伦琴于 1895 年发现 X 射线以来, 其成像技术便被广泛应用于科学研究、医疗诊

断、工业无损检测、安全检查等领域^[1-4]。X 射线成像探测技术历经了胶片-增感屏成像技术、影像增强器成像技术、计算机 X 射线成像技术、平板探测器成像和计算机层析扫描成像技术的发展过程^[5]。

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-05-28; 录用日期: 2021-06-27

基金项目: 福建省科技重大专项专题项目 (2020HZ06006)

通信作者: *peterchen@indigo-imaging.com

1975年,德国的Hartmann等^[6]用荧光物质作为X射线转换屏,搭建了世界上第一个X射线间接成像探测器系统。目前,常用的间接式X射线探测器(IXD)依赖于间接式的闪烁成像技术,即由闪烁体材料将X射线转换为可见光后,再利用图像传感器进行成像检测。近年来,新材料、半导体制造工艺和集成电路技术等快速发展,对IXD的进步带来了巨大的推动作用。

闪烁屏和图像传感器的基本特性直接决定了IXD的性能。近年来,除了CsI:Tl、Gd₂O₃:Tb(GOS:Tb)、Y₃Al₅O₁₂:Ce(YAG:Ce)等传统闪烁体外,一些具有独特性能的新型闪烁体在IXD中展现出了巨大的应用潜力。例如,卤化物钙钛矿闪烁体^[7-9]、新型铀基闪烁体^[10]和新型玻璃闪烁体^[11]等。在图像传感器方面,性能不断提升的互补型氧化物金属半导体(CMOS)图像传感器在各应用领域正逐步取代电荷耦合器件(CCD)图像传感器^[12],2009年出现的科学级CMOS(sCMOS)图像传感器在微光探测、高速成像检测、科学研究等领域发挥着越来越重要的作用^[13-14]。2016年,国内外先后推出的背照式sCMOS(BSI sCMOS)图像传感器进一步改善了灵敏度、量子效率、帧速率、动态范围、噪声和功耗等^[15],这对于满足制作商业化的高性能IXD的需求发挥了重要作用。

自20世纪70年代末起,研究人员便开始了闪烁屏与图像传感器间的耦合方式方面的研究,目前较为成熟的耦合方式包括光纤耦合^[4,16-18]和光学透镜耦合^[4,19-21]。采用光纤耦合方式制作的IXD具有耦合效率高、制作工艺简单、结构紧凑、体积小等优势,因此它拥有很好的商业化应用前景。光学透镜耦合方式使用的频率最高,结合同步辐射X光源或微焦点X射线管,它可实现高达亚微米级的空间分辨率^[22-23]。此外,闪烁屏与图像传感器之间还可以采用无中继光学传输器件的直接耦合方式^[24-26]。这种耦合方式在制作技术、成本和稳定性等方面有较高要求,从而限制了其应用范围。

目前,IXD在医学、工业、安检、科研等领域发挥着越来越重要的作用。随着科技的不断进步,各应用领域对IXD的分辨率、灵敏度、成像速度、成本以及可靠性等方面提出了更高的要求。因此,不断开发具有优异探测性能的IXD具有重要的理论和现实意义。本文首先介绍了IXD中闪烁屏与图像传感器的研究现状,然后总结了闪烁屏与图像传感器

之间的耦合方式的结构和特点,最后展望了IXD未来发展的趋势。

2 闪烁屏

闪烁屏的主要功能是将X射线转换为可见光,其光转换性能是影响IXD性能的关键因素。闪烁屏的光转换性能主要取决于制备闪烁屏的闪烁体材料和闪烁屏结构的特性。

2.1 闪烁体材料

闪烁体是一类吸收高能粒子或射线后能够发光的功能材料,它广泛应用于医学成像、高能物理实验、工业探伤、安检及天文观测等领域^[27]。从最早1896年发现的CdWO₄(CWO)闪烁体到后来商业化的CsI:Tl、YAG:Ce及Bi₄Ge₃O₁₂(BGO)等闪烁体,其种类和应用得到了不断地丰富和拓展^[28-29]。闪烁体主要经历了三个发展阶段:第一阶段是早期随着伦琴发现X射线而出现的CWO闪烁体;第二阶段是随着光电倍增管的发展和蔡闪烁现象的发现而研制的NaI:Tl闪烁体;第三阶段是随着高能物理上精密量热技术和医学成像上高光输出需求的闪烁体而进入的大复兴阶段^[27-28,30]。

闪烁体一般可以分为有机闪烁体和无机闪烁体。有机闪烁体的密度和有效原子序数小、光产额低、能量分辨率和X射线吸收效率等特性通常较差^[27],因此在IXD中很少使用。无机闪烁体按形态可以分为单晶闪烁体、粉末闪烁体、陶瓷闪烁体和玻璃闪烁体^[27]。一般在IXD中使用的闪烁体通常需要具备高密度、较大的有效原子序数、发光主波长与图像传感器的响应匹配良好、快衰减、高光产额、耐辐射及稳定的物化性质等特性。表1列出了几种常见闪烁体的基本特性参数^[10,27-31]。

在IXD中,通常采用3种综合性能优异的传统闪烁体^[25,32-34]:具备无色透明、高光产额、抗辐射性能和均匀性良好等特性的CsI:Tl单晶闪烁体;拥有高X射线转换效率、高密度、高光产额、耐辐射、良好的化学和热稳定性等特性的GOS:Tb粉末闪烁体;具有快衰减、较高的光产额、较低的成本、较好的抗辐射性能和机械稳定性等特性的YAG:Ce单晶闪烁体。此外,常用的闪烁体还包括CWO、Lu₂SiO₅:Ce(LSO:Ce)、Gd₂O₃:Eu闪烁体等^[35-37]。为了提高IXD中闪烁体材料的综合性能,通常采用两种方式:一是替换化学元素,如CaWO₄、LuAl₅O₁₂:Ce(LuAG:Ce)、Gd₃Ga₅O₁₂:Tb(GGG:Tb)闪烁体

表 1 几种常见闪烁体的基本特性参数

Table 1 Basic characteristic parameters of several common scintillators

Scintillator	Density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Effective atomic number Z_{eff}	Dominant wavelength of luminescence /nm	Decay time /ns	Light yield / MeV^{-1}
CsI:Tl	4.51	54	550	1000	66000
GOS:Tb	7.34	59.5	545	5500	60000
YAG:Ce	4.56	32	550	90~100	30000
$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$	6.67	63	530	55~65	25000
BGO	7.10	74	480	300	8600
CWO	7.90	64	495	5000	20000

等^[26,36];二是共掺杂,如 $(\text{Lu}, \text{Y})_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LYSO:Ce)、GOS:(Pr, Ce, F)、 $\text{Gd}_3(\text{Ga}, \text{Al})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce)闪烁体等^[36,38-39]。此外,研究人员还通过其他方式进一步提升闪烁体性能,如激活剂的掺杂浓度研究、改善团聚现象、改进材料制备方法以及大面积薄膜制备工艺等^[29,37,40]。

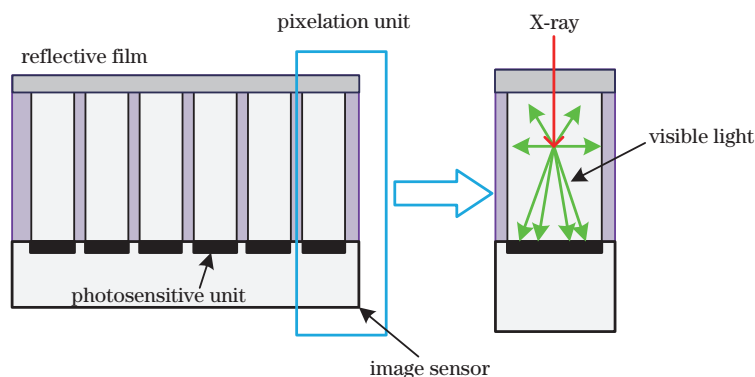
随着材料科学的不断发展,近年来许多性能优异的新型闪烁体材料在IXD中展现出巨大应用前景。例如,近几年研究发现卤化物钙钛矿闪烁体具有高X射线转换效率、较高的光产额、快衰减以及发光带隙可调等优点^[7-9]。新型铀基闪烁体展现出了较高的X射线转换效率、较好的辐照与湿度稳定性以及更短的余辉等特点^[10]。此外,制备成本低、易加工且化学配比灵活的新型玻璃闪烁体在高掺、大尺寸制备和光纤化方面具有明显优势,目前相关研究仍处于探索阶段^[11]。随着对IXD应用性能要求的不断提高,研发出同时具备高X射线转换效率、高光产额、快衰减、耐辐射、高稳定性和低成本等综合性能优良的闪烁体是未来闪烁体材料研究的重点。

2.2 闪烁屏的像素化结构

传统闪烁屏的结构通常由玻璃基板、闪烁体薄膜以及反射涂层组成。玻璃基板作为支撑板用以

提升闪烁屏的稳定性;闪烁体薄膜常用晶体块或微晶粉末闪烁体制备而成;反射涂层常采用铝或 TiO_2 进行制备,它不但起保护闪烁体薄膜的作用,而且能够提高闪烁屏的光收集效率^[33]。以CsI:Tl闪烁晶体和GOS:Tb粉末闪烁体为例,CsI:Tl闪烁屏通常采用真空沉积的方式将CsI:Tl制备成晶柱状的闪烁屏,而GOS:Tb闪烁屏通过采用粒子结合法和丝网印刷法结合热硬化工艺进行制备^[33,40-42]。

通常较厚的闪烁体薄膜产生的次级可见光光子具有各向同性的特征,因此会造成输出的可见光光子在图像传感器相邻的像素中扩散,恶化成像质量^[43]。为了减少闪烁屏的横向扩散现象,提高其空间分辨率,常用的方法是将闪烁屏加工成像素化结构。如图1所示,闪烁屏的像素化结构是通过将闪烁屏加工成具有独立传导光子的像素化微孔结构,由孔柱内光引导使光子在像素化结构内部低损耗传输,同时减少了相邻像素结构之间的光串扰现象^[24,44-45]。像素化结构的闪烁屏通常是将闪烁体材料填充至具有硅孔阵列的基板中进行制备。首先利用激光切割或光刻工艺和深度反应离子刻蚀技术在基板上制备硅孔阵列,然后将闪烁体填充至硅孔阵列中,基板表面上过量的闪烁体通过抛光或机

图 1 闪烁屏的像素化结构^[40]Fig. 1 Pixel structure of the scintillation screen^[40]

械方法去除^[43-47]。

为了优化 IXD 的空间分辨率与闪烁体厚度之间的关系, Nagarkar 等^[48]于 1998 年开发了结构化的闪烁屏。随后, 研究人员展开了对闪烁屏的像素化结构方面的研究, 主要研究内容包括像素孔阵列基板的制备方法和工艺^[44-45]; 像素孔的形状(圆形、方形或多边形等)、大小及深度等因素对闪烁屏性能的影响^[43, 46, 49]; 减少横向扩散效应现象^[44]等。例如, Badel 等^[49]研究表明像素孔的深度与闪烁屏的信噪比(SNR)存在着以下的定性关系:

$$R_{\text{SN}} = \sqrt{N \times [1 - \exp(-\alpha \times d)]}, \quad (1)$$

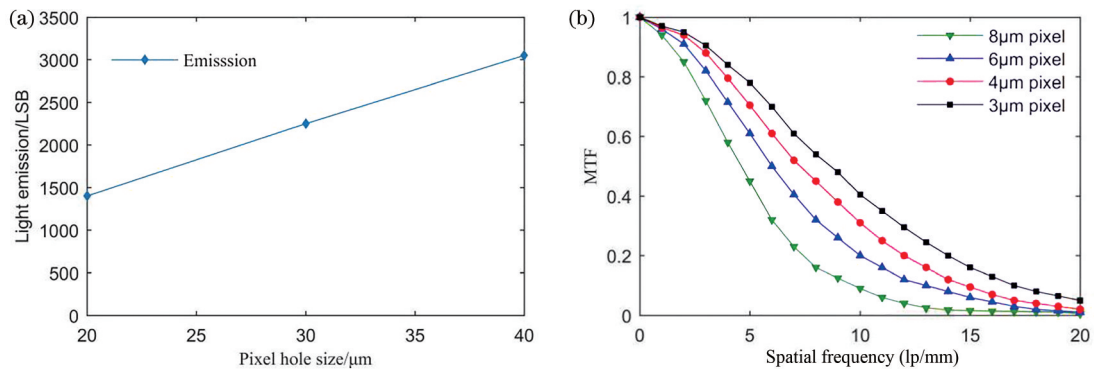


图 2 像素孔尺寸对闪烁屏性能的影响。(a) 闪烁屏的像素孔尺寸与光输出关系^[46]; (b) 不同像素孔尺寸的 MTF 曲线^[45]

Fig. 2 Influence of pixel hole size on performance of scintillation screen. (a) Relationship between size of pixel hole and the light emission of scintillation screen^[46]; (b) MTF curves of different pixel hole sizes^[45]

随着对 IXD 成像质量要求的提高, 闪烁屏需要具备更好的均匀性和致密度、更好的依附性以及更小的余辉、较高的空间分辨率、便于与其他器件耦合等特性。虽然具有像素化结构的闪烁屏提高了 IXD 的成像质量, 但它的光输出低于非像素化结构的闪烁屏^[44, 46]。随着像素化结构的像素孔尺寸和深度减小, 闪烁屏的分辨率显著提高, 但光输出会同时降低。因此, 在不牺牲闪烁屏光输出的情况下同时提高其空间分辨率还需进一步的研究, 且如何优化 IXD 的分辨率与小像素孔尺寸闪烁屏的成本效益也是一个值得关注的问题。

2.3 闪烁屏厚度的优化

从早期的研究开始, 研究人员便注意到了闪烁屏的厚度(尤其指闪烁体薄膜层的厚度)是影响 IXD 性能的一个重要因素。如 Koch 等^[50]的研究表明采用透镜耦合方式制作的 IXD 的分辨率 R 可以由下式计算得出,

$$R = \sqrt{(p/NA)^2 + (q \cdot z \cdot NA)^2}, \quad (2)$$

式中: p 和 q 是根据系统的线扩散函数选定积分情况

式中: N 是入射 X 射线光子的数量; d 是闪烁体厚度; α 是选定能量下闪烁体的吸收系数。由(1)式可以看出, 闪烁屏的 SNR 随像素孔的深度增加而增大。Svenonius 等^[46]指出 CsI:Tl 闪烁屏的光输出随像素孔尺寸增大而增加, 如图 2(a) 所示。Yao 等^[45]通过测量 CsI:Tl 闪烁屏的调制传递函数(MTF)来表征其成像质量, 结果表明闪烁屏的空间分辨率随像素孔的减小而增大, 如图 2(b) 所示。为进一步改善横向扩散效应问题, Cha 等^[44]利用纳米晶闪烁体代替微晶闪烁体制备闪烁屏, 用以增加闪烁屏的堆积密度和光输出, 并同时保持较高的分辨率。

下的系数; NA 表示光学透镜系统的数值孔径; z 为闪烁体的厚度。(2)式中第一项对应的是光学系统的焦深, 第二项对应的是光学系统的像差。从(2)式可以看出, 闪烁屏的厚度直接影响 IXD 的性能。

在后续的研究中, 研究人员常通过优化闪烁屏的厚度来提高 IXD 的探测量子效率(DQE)、灵敏度和分辨率等。有关闪烁屏厚度对 IXD 性能影响方面的研究, 主要围绕透镜耦合方式展开, 而在光纤耦合和直接耦合方式的研究中鲜有报道。当 X 射线在闪烁屏中的穿透长度大于光学透镜系统的景深时, 更薄的闪烁体具有更高的分辨率, 但同时其光输出降低, 导致 IXD 的灵敏度降低; 而随着闪烁体的厚度增大, IXD 的探测效率将会提高, 但探测器的光学系统像差增大, 导致其空间分辨率降低^[22]。例如, Xie 等^[19]研究发现将闪烁屏厚度与光学透镜系统的数值孔径进行优化匹配时, IXD 的成像质量会显著提高。张永兴等^[22]的研究表明, 闪烁体厚度对于低倍放大显微镜镜头系统影响不大, 而对于高倍放大显微镜镜头系统则影响较大。他们研究的结果表明对于大于 20 倍的放大倍率的显微透镜, 应该匹

配厚度小于 $20\ \mu\text{m}$ 的 YAG:Ce 闪烁体以获得更高成像质量。Guo 等^[41]指出微米级 CsI:Tl 薄膜的厚度是影响 IXD 成像质量的关键因素。一般 IXD 的空间分辨率可以用刀口法测量系统的 MTF 来进行

表征。Cha 等^[42]测量了不同厚度的 GOS:Tb 闪烁屏的光输出和 MTF,结果表明闪烁屏的光输出随其厚度的增加而增大,但其空间分辨率会随之减小,如图 3(a)和(b)所示。

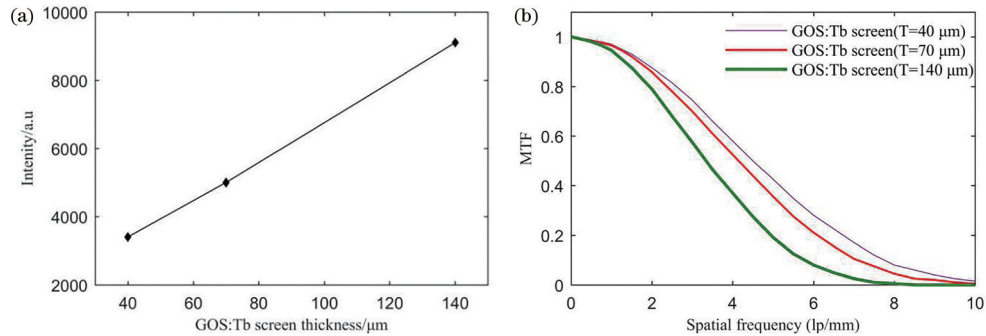


图 3 GOS:Tb 闪烁屏厚度对闪烁屏性能的影响。(a)GOS:Tb 闪烁屏厚度与光输出的关系;(b)不同 GOS:Tb 闪烁屏厚度的 MTF 曲线^[42]

Fig. 3 Influence of GOS:Tb scintillation screen thickness on performance of scintillation screen. (a) Relationship between thickness of GOS:Tb scintillation screen and light emission; (b) MTF curve of different GOS:Tb scintillation screen thicknesses^[42]

因此,在制备闪烁屏时,需要考虑 IXD 的灵敏度及 DQE 与空间分辨率之间的折中平衡,这可以通过优化闪烁屏的厚度得以实现。为进一步提高闪烁屏的性能,可结合像素化结构闪烁屏的方式来提升成像质量。闪烁屏厚度除了要满足与光学透镜或光纤特性参数的最佳匹配外,它还应该满足与 X 射线剂量和图像传感器性能等条件的最佳匹配,但目前对于这方面的研究相对较少。

3 图像传感器

3.1 CCD 图像传感器

CCD 图像传感器是由美国贝尔实验室的 Boyle 和 Smith 于 1970 年发明,它由紧密排列在硅衬底上的金属氧化物半导体(MOS)电容器件阵列构成,其基本功能是实现光电转换及信号电荷的存储和转移^[51]。CCD 图像传感器在多相驱动脉冲下工作,主要有帧转移结构、行间转移结构及帧-行间转移结构的驱动方式^[51]。如图 4 所示,CCD 图像传感器的工作原理是将入射光子转换成光电二极管阵列中的电子,并将产生的信号电荷存储于阵列像素中。当读出信号电荷时,在驱动电压的作用下信号电荷从一个势阱转移至相邻势阱中。最底层的一行像素中的信号电荷被传输到相应的串行移位寄存器中,电荷再水平传输至读出放大器中转换成电压,然后被模数(A/D)转换电路转换成数字图像信号进行输出^[13,52]。

2000 年,研究人员通过在 CCD 图像传感器的

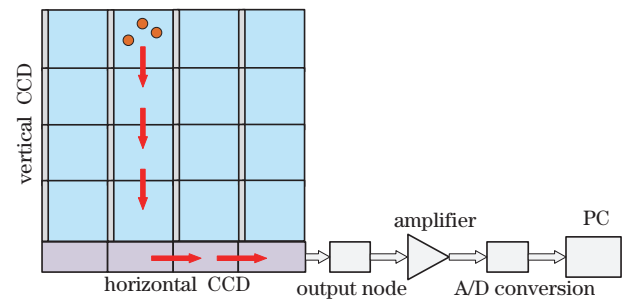


图 4 CCD 图像传感器工作原理^[52]

Fig. 4 Working principle of CCD image sensor^[52]

移位寄存器后增加一个乘法寄存器研发出了电子倍增型 CCD(EMCCD)图像传感器,它具有宽动态范围、高灵敏度的特点,但乘法寄存器增加了乘性噪声,降低了 SNR^[14,52]。在 EMCCD 出现之前,主要采用增强型 CCD(ICCD)图像传感器来实现微光成像探测。ICCD 图像传感器可以实现纳秒级的快门控制,但它会损失空间分辨率,且其量子效率有限、成本较高^[13]。此外,时间延迟积分型 CCD(TDICCD)图像传感器通过对同一物体进行多行线阵像元信号相加成像,减小了像元之间的响应不均匀性。采用 TDI 成像模式可在满足空间分辨率的条件下提升 SNR^[53]。在工业应用领域,线列或 TDICCD 图像传感器仍然不可替代^[54]。

自 CCD 图像传感器出现以来,研究人员通过各种方法对其性能进行不断改进,其中主要包括通过埋沟器件提高电荷转移效率、加微透镜和采用背照

减薄方式提高量子效率、采用 Binning 工作模式提高灵敏度、使用制冷技术降低噪声和暗电流、采用多层滤光技术、用 p 阱结构抗高光溢出等^[51-52,55-57]。尽管 CCD 图像传感器的性能已经有了很大提升,但仍存一些缺点有待进一步的改进。例如,CCD 图像传感器存取图像速度较慢;采用较大驱动电压(12~18 V),因而功耗高;无随机存取和开窗能力;通过外部采样放大及 A/D 转换电路,所以集成度低且成本较高;不兼容标准工艺以及工艺复杂等问题。

早期,由于 CCD 图像传感器相较于 CMOS 图像传感器在灵敏度、分辨率和噪声等方面具有明显优势,因而在 IXD 中得到广泛应用。随着半导体制造工艺和集成电路技术的发展,如今 CCD 图像传感器的优势逐渐被缩小。CCD 图像传感器在 IXD 中的进一步应用受到了其低帧速率、高功耗、较小的成像面积和低集成度等方面的限制。因此,近年来,CCD 图像传感器在 IXD 中的使用占比在逐渐减小。从图像传感器的最大生产商索尼公司于 2017 年宣布停产 CCD 图像传感器可以预见,CCD 图像传感器被 CMOS 图像传感器取代的趋势愈加明显。

3.2 CMOS 图像传感器

CMOS 图像传感器最早出现于 1969 年,其基本结构主要由像素单元阵列与外围辅助控制电路组成^[56],如图 5 所示。像素单元阵列是 CMOS 图像传感器的核心,其功能是实现光电信号的转换,并输出电信号。在每个像素单元内,入射光子首先被光电二极管转换为信号电荷,然后由放大器对信号进行放大处理,同时将电荷信号转换为电压信号^[52,55-56]。外围辅助控制电路包括时钟控制器、时序发生器、模拟信号处理器、模数转换器、通信和数据

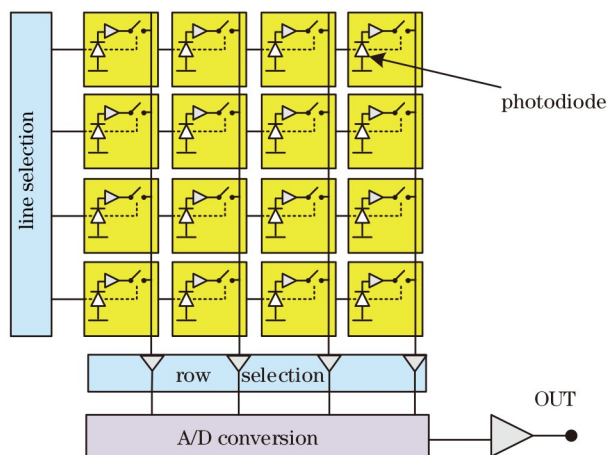


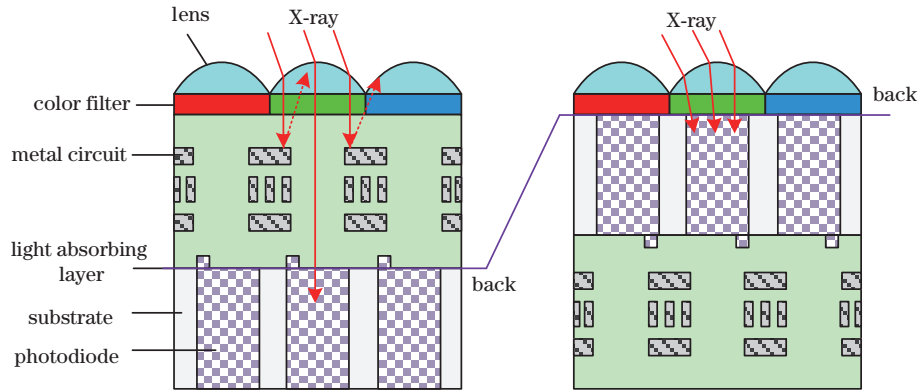
图 5 CMOS 图像传感器的基本结构^[52]

Fig. 5 Basic structure of CMOS image sensor^[52]

传输接口电路等,其作用是产生像素单元的驱动信号,并将模拟信号进行放大和 A/D 转换处理^[52]。

早期,CMOS 图像传感器基本都属于无源像素传感器(PPS),其像素结构由 1 个光电二极管、1 个复位 MOS 场效应管和 1 个 MOS 场效应开关管组成^[12]。虽然 PPS 像元结构简单且填充因子大(约 70%),但其读出噪声大且灵敏度低。后来,国际上开始了有源像素传感器(APS)的研究,它是在 PPS 的基础上增加具有放大和缓存作用的源极跟随放大器,将信号在像素内部进行放大,从而降低了读出噪声并提高了帧速率^[58]。但 APS 存在像素单元结构复杂、填充因子小(一般只有 20%~30%)的问题。目前发展的是性能更加优异的数字像素传感器(DPS),它是在 APS 的基础上集成 A/D 转换器和存储单元,使输出的信号直接变成数字信号,并通过存储单元对数字信号进行存储。DPS 有效改善了时域噪声及固定模式噪声(FPN)问题,但其像素单元内增加了晶体管,降低了填充因子,所以在设计与制造方面具有很大挑战^[52]。

随着集成电路技术和制造工艺的快速发展,CMOS 图像传感器的性能得到不断提升。用于提升 CMOS 图像传感器性能的方法主要包括加微透镜提高填充因子;通过相关双采样(CDS)技术改善 FPN;抑制噪声电路技术降低噪声;采用背照式(BSI)技术、堆栈式技术和像素重排技术提高量子效率、SNR 和成像质量等^[12,15,55-59]。其中背照式 CMOS(BSI CMOS)图像传感器的结构相较于前照式 CMOS(FSI CMOS)图像传感器有很大改进。FSI CMOS 图像传感器结构的光电二极管位于芯片的最下层,光线经过金属线路连接层到达光电二极管后有较大损失。而 BSI 技术通过将光电二极管置于放大器等晶体管以及互联电路的上层来解决该问题,其结构如图 6 所示。虽然 BSI CMOS 图像传感器在灵敏度和量子效率上有了质的飞跃,但它需要减薄衬底和应用抗反射层,因而需要更高的制备工艺要求。BSI 技术正在慢慢成为主流技术^[12]。随着制造技术的进步,在 BSI 工艺的基础上又发展出了堆栈式工艺。堆栈式技术的原理是使用有信号处理电路的芯片替代原来的支撑基板,在芯片上重叠形成像素部分,从而实现了在较小的芯片尺寸上形成大量像素点的工艺^[59]。堆栈式技术能为设计人员提供更大的灵活性,进而允许 CMOS 图像传感器在功能和性能上有更大的突破。近两年发展

图 6 前照式与背照式 CMOS 图像传感器结构的比较^[59]Fig. 6 Comparison of front illuminated and back illuminated CMOS image sensor structures^[59]

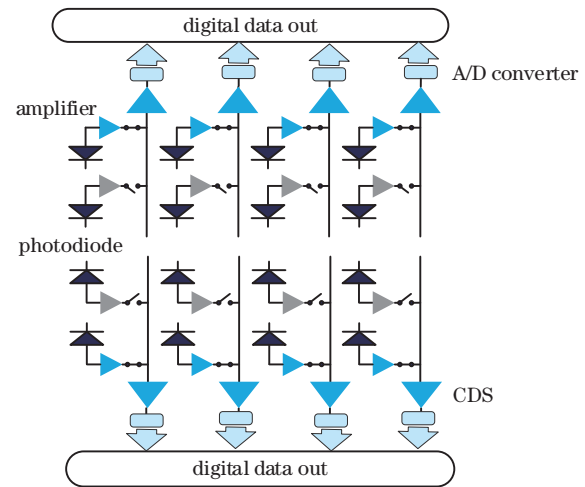
的像素重排技术相较于传统的拜尔阵列有了较大改进,得以实现真正的高像素,进一步改善成像质量。堆栈式技术和像素重排技术是 CMOS 图像传感器未来发展的方向之一。

CMOS 图像传感器具有高帧速率、低功耗、可开窗、抗光晕、高集成度及低成本等优点,但它同时存在像元内集成多晶体管导致填充因子减小、FPN、像素的饱和与溢出模糊、高速成像时卷帘快门引起的果冻效应等问题^[12,60]。近年来,CMOS 图像传感器的发展趋势是在像素内集成存储和人工智能运算单元,使 CMOS 能够完成一些高级图像处理算法,实现多功能和智能化,从而逐步占据微光探测、医疗、科学探测等高端市场。

早期,由于 CMOS 图像传感器的灵敏度较低、噪声大、成像质量差,因而在 IXD 中使用占比较小。近年来,由于集成电路设计技术和工艺水平的进步,CMOS 图像传感器性能不断提高,尤其在速度、灵敏度、分辨率、暗电流和功耗等方面都有明显提升和改善。通过噪声抑制技术、FPN 校正电路设计和算法、像素结构设计及数字信号处理技术等,CMOS 图像传感器过去存在的主要缺点,现在都能得到改善。目前,CMOS 图像传感器凭借其帧速率、抗辐射性能、成像面积、成本、功耗及集成度等方面的优势在 IXD 中应用日益广泛。

3.3 sCMOS 图像传感器

2009 年,由 Andor 公司、Fairchild Imaging 公司和 PCO AG 公司联合研发了一种专门为科学成像应用的 sCMOS 图像传感器^[61]。sCMOS 图像传感器集合了 CCD 图像传感器的基底构造体系以及 CMOS 图像传感器的读出集成电路结构,其结构如图 7 所示。sCMOS 图像传感器每个像素中都有一

图 7 sCMOS 图像传感器的结构原理^[62]Fig. 7 Structure and principle of CMOS image sensor^[62]

个光电二极管和放大器将输入的光信号转换成电压信号。此外,sCMOS 图像传感器采用分离式读出方案,通过上下两行放大器和 A/D 转换器并行同步读取每条水平线的数据,同时实现了低噪声和高速读出^[62]。双列电平放大器和 A/D 转换器具有独立的增益设置,通过组合来自高增益和低增益通道的信息来重构图像,从而实现宽动态范围^[13-14,62]。

BSI sCMOS 图像传感器技术在国内分别于 2016 和 2017 年推出,其量子效率由原来的 60% 左右提高到 95% 左右,并且像元尺寸也得到了很大的提高^[14]。相较于前照式 sCMOS 图像传感器的结构,BSI sCMOS 图像传感器中的 A/D 转换器不占据像元的面积,填充因子也大幅提高。随着制造工艺水平的提升,具有低噪声、高灵敏度、高帧速率、宽动态范围等特性的 BSI sCMOS 图像传感器已经市场化。目前,对于 sCMOS 图像传感器的研究主要集中在深度制冷和噪声抑制技术、高速成像系统

应用以及微光探测领域方面^[13-14,62-63]。

sCMOS 图像传感器是基于 CMOS 图像传感器和 CCD 图像传感器的设计和制造技术的突破性技术,它改进了传统 CMOS 图像传感器高读出噪声和低填充因子等缺点,同时具备 CCD 图像传感器高灵敏度、快读取速度的优点。此外,它还具有宽动态范围、高帧速率以及高 SNR 等优点。然而,sCMOS 图像传感器仍然存在 FPN 和结构复杂等问题。此外,高速成像应用中产生的海量数据对 sCMOS 图像传感器数据的传输、存储及分析能力都提出了更高要求^[14]。为此,近年来研究人员通过各种技术致力于进一步提升 sCMOS 图像传感器的性能,如通过 FPN 的自适应性测试与修正、改进浮置扩散放大器结构、提高衬底电压同时制冷与恒温等^[13-14,64]。为了更好地分辨图像,在 sCMOS 图像传感器中添加拜尔滤镜进行彩色成像的同时保持其高灵敏度和 SNR 仍需进一步的研究。

近年来,高性能的 sCMOS 图像传感器逐渐应用于较高成像要求的应用领域,如微光探测、天文观测、生命科学成像等。随后,sCMOS 图像传感器在高分辨率、高速 X 射线成像探测应用中逐渐受到关注。在 IXD 中,自 2009 年推出 sCMOS 图像传感器以来,它就陆续被用于高分辨率、高灵敏度、大面阵、宽动态范围、高帧速率成像方面。随着半导体材料制备工艺的逐渐发展和完善,制约 sCMOS 图像传感器发展的灵敏度、FPN 和分辨率等问题得到了逐步地完善。特别是近两年,在 IXD 中采用 sCMOS 图像传感器进行高分辨率、高灵敏度及高速实时成像等方面的研究日趋明显。

一般表征图像传感器性能的指标主要包括灵敏度、量子效率、SNR、噪声、功耗、帧速率、动态范围等。表 2 列出了上述三种图像传感器的主要性能指标。

表 2 不同图像传感器的主要性能对比

Table 2 Main performance comparison of different image sensors

Performance index	CCD image sensor	CMOS image sensor	sCMOS image sensor
Sensitivity	High	Medium	High
SNR	Medium	High	High
Quantum efficiency	Medium	High	High
Noise	Small	Medium	Small
Power consumption	High	Low	Low
Frame rate	Slow	Fast	Fast
Dynamic range	Medium	Small	Large

4 闪烁屏与图像传感器之间的耦合方式

4.1 光纤耦合方式

光纤耦合方式具体可分为光纤光锥(FOT)耦合方式和光纤面板(FOP)耦合方式。光纤耦合方式具有耦合效率高、制作工艺简单、结构紧凑以及体积小等优点,但它同时存在结构灵活性较差和耦合工艺要求高的问题。对于 X 射线成像应用,光纤耦合方式不但为紧凑型光学成像系统提供了解决方案,而且在灵敏度和空间分辨率之间提供了很好的折中方案^[17]。

4.1.1 FOT 耦合方式

FOT 具有短物距、大 NA 的特点,它可以根据放大或缩小图像的传输来改变成像面积。如图 8 所示,FOT 耦合方式的基本结构主要由防护层、闪烁屏、FOT 和图像传感器等组成。其中制备闪烁屏的闪烁体和图像传感器通常分别选择具有高 X 射线转化效率、高光输出的 GOS:Tb 闪烁体和高灵敏度、低噪声的 CCD 图像传感器,FOT 的锥度比一般在 1.5:1 到 5:1 之间。由两个耦合层将 FOT 的大、小端面分别与闪烁屏和图像传感器进行耦合,耦合层选用的黏接剂通常为环氧树脂胶或光敏胶^[16-17]。

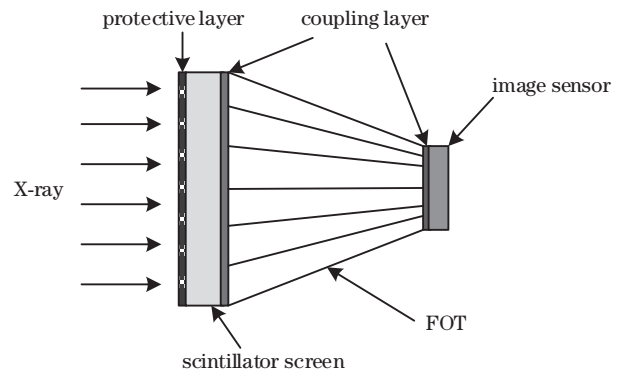


图 8 FOT 耦合方式的结构^[16]

Fig. 8 Structure of FOT coupling mode^[16]

具有 FOT 耦合结构的 IXD 主要应用于医疗诊断、大分子晶体学和生物医学成像研究。FOT 耦合技术最初是由美国的 Fairchild 公司在 20 世纪 80 年代初提出,刚开始 FOT 耦合技术主要应用于微光成像领域中 ICCD 图像传感器探测器的研发,后来逐渐在 X 射线成像探测领域得到了广泛关注^[65]。随着闪烁体材料、FOT 和图像传感器的不断发展,包括 GOS:Tb 及 CsI:Tl 闪烁体制备技术和性能的提升、FOT 制备工艺和质量的改善以及 CCD 图像传

感器在像素尺寸、分辨率和灵敏度等方面的改进, IXD 的性能不断提升。研究人员对 FOT 耦合方式结构的改进主要围绕两个方面进行: 一是为满足医学诊断低辐射剂量、高灵敏度的需求, 通过 EMCCD 图像传感器代替 CCD 图像传感器或用增加像增强器的方式来提高 IXD 的灵敏度和 DQE; 二是为增加大分子晶体学和医学等研究的成像视野, 通过设计二维 FOT 阵列耦合结构来实现大面积成像。例如, 为提升 IXD 的紧凑性和应用场合, 宋岩等^[66]采用 FOT 耦合方式来取代针孔成像法中的光学透镜耦合方式。为提高 IXD 的灵敏度和分辨率, Wang 等^[67-69]所在的课题组分别对增加像增强器的 FOT 耦合方式和用 EMCCD 图像传感器代替 CCD 图像传感器的 FOT 耦合方式进行了研究。为实现大面积成像, 赵志刚等^[70]设计了一种可微调的非黏结 2×2 的 FOT 阵列耦合结构的 IXD, 其成像面积达 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 他们还采用像素化结构的闪烁屏进一步提高了空间分辨率。

采用 FOT 耦合方式制作的 IXD 具有耦合效率高、成像面积较大、结构紧凑、体积小等优点, 但它同时存在系统灵活性差、结构稳定性差、图像失真和耦合工艺要求高等问题。其 DQE 与空间分辨率受到许多因素的影响, 如 FOT 单丝直径的大小、FOT 单丝与 CCD 图像传感器像素的错位排列、FOT 的锥度比、耦合工艺以及 FOT 质量等^[16]。为进一步提高 IXD 的性能, 后续可通过提升 FOT 质量、结合像素化结构的闪烁屏、使用更高性能的 CMOS 图像传感器或 sCMOS 图像传感器等方式进行研究。目前, 在商业化的 X 射线相机中常采用 FOT 耦合技术来实现较大的成像视野和较好的成像性能。随着 FOT 制备和耦合工艺的逐渐成熟, 基于 FOT 耦合技术研制的 IXD 将具有巨大的市场应用前景。

4.1.2 FOP 耦合方式

FOP 具有光传输效率高、级间耦合损失小、传像清晰、无几何失真等特点。FOP 耦合方式能够实现 1:1 的图像传输, 耦合效率可达 70% 以上^[71]。FOP 耦合方式的结构与 FOT 耦合方式的结构非常相似, 其结构如图 9 所示。在 FOP 耦合方式的结构中, 闪烁体和图像传感器通常分别选用高性能的 GOS: Tb、CsI: Tl 闪烁体和较大成像面积、耐辐射的 CMOS 图像传感器, 耦合层选用的黏接剂通常为环氧树脂胶或光敏胶^[17]。

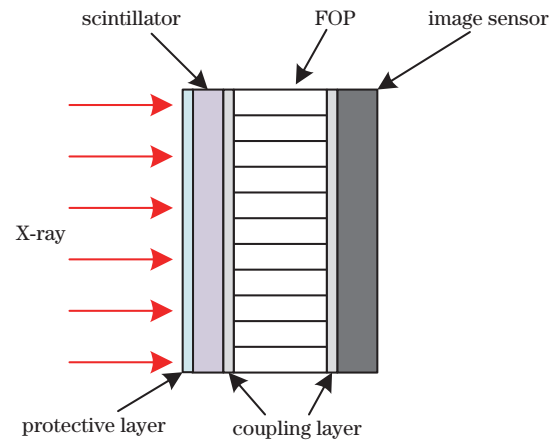


图 9 FOP 耦合方式的结构^[72]

Fig. 9 Structure of FOP coupling mode^[72]

具有 FOP 耦合结构的 IXD 主要应用于医学成像、工业无损检测和 X 射线层析成像方面的研究。随着图像传感器的发展, CMOS 图像传感器在像素尺寸、噪声和分辨率等方面得到明显改善。近年来逐渐使用高帧速、耐辐射、低功耗及低成本的 CMOS 图像传感器取代早期常用的 CCD 图像传感器。此外, 为提高分辨率和成像视野, 研究人员常通过设计像素化结构的闪烁屏和 FOP 阵列结构进行优化。例如, 为了提高 IXD 的分辨率, Svenonius 等^[46]采用 CsI: Tl 闪烁体制备像素化结构的闪烁屏与 FOP 进行耦合制作了高性能的 IXD, 实验表明他们制备的 IXD 的空间分辨率达 23 lp/mm (每毫米可明显区分的黑白线对数)。为实现低剂量、高分辨率的 X 射线成像, Uesugi 等^[18]将采用 FOP 耦合方式研制的 IXD 引入 X 射线成像显微镜光学系统中, 用于 X 射线显微层析成像。实验结果表明, 他们实现了亚微米级 (可达 200 nm) 的分辨率成像, 且 X 射线剂量可降低 10% 左右。为实现大面积成像, Thompson 等^[72]通过设计 2×3 FOP 阵列耦合结构的方式开发出了一个成像面积可达 $282 \text{ mm} \times 295 \text{ mm}$ 的 IXD。

采用 FOP 耦合方式制作的 IXD 具有结构紧凑、耦合效率高、无图像失真、体积小以及耦合工艺要求不高等优点, 但它同时存在成像面积较小、结构灵活性差以及辐射损伤等问题。FOP 耦合方式的分辨率不仅与 FOP 单丝的直径有关, 还与它的厚度有关, 总的趋势是单丝直径越大、光纤面板越厚, IXD 分辨率越低^[73]。此外, 光耦合介质也会对光输出产生影响。为进一步提高 IXD 的性能, 后续可通过提升 FOP 质量、优化闪烁屏和 FOP 的厚度、增加

吸收丝或反射涂层等方式进行研究。如今,在商业化的高性能、小型化 X 射线相机中,常采用 FOP 耦合技术来提升其性能和稳定性。

4.2 光学透镜耦合方式

光学透镜耦合方式的结构主要由闪烁屏、光学透镜系统及图像传感器等部分组成,其结构如图 10^[22]所示。为避免图像传感器受到辐射损伤,通常加反射镜将透过闪烁屏的部分 X 射线从光路中分离^[74]。随着第三代同步辐射源的广泛应用,X 射线成像技术得到了迅速发展^[23]。在光学透镜耦合方式研制的 IXD 中,通常使用具有高亮度、高准直、准相干、高通量及高稳定性等特性的同步辐射 X 射线源。一般主要采用 YAG:Ce、GOS:Tb 和 CsI:Tl 等闪烁体制备闪烁屏,图像传感器则根据不同应用需求选择不同的图像传感器。

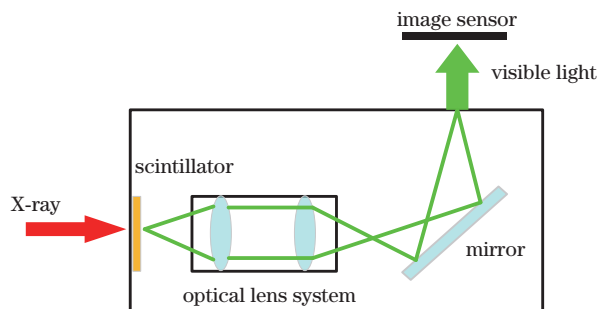


图 10 光学透镜耦合方式的结构^[22]

Fig. 10 Structure of coupling mode of optical lens^[22]

自 1996 年以来,研究人员在同步辐射源上发展了用于在亚微米和微米范围内高空间分辨率成像的具有光学透镜耦合结构的 IXD^[20,23,50,61,74]。采用光学透镜耦合方式制作的 IXD 广泛应用于显微层析成像、材料科学、医学成像及科学研究等领域,一直以来它都是研究的热点。近年来,为了提高 IXD 的性能,研究人员在各个方面进行了改进。在闪烁屏方面,主要通过优化闪烁屏的厚度以及使用新型闪烁体材料(如 LuAG:Ce、GAGG:Ce、LYSO:Ce、CsPbBr₃ 钙钛矿材料等)来提高其分辨率和光输出^[9,21,36,39];在图像传感器方面,为满足高速、高分辨率、低照度等方面成像需求,主要采用性能更加优异的 CMOS 图像传感器及 sCMOS 图像传感器来提高 IXD 的灵敏度、DQE、分辨率和成像速度等方面的性能^[21,32,74];在光学透镜系统方面,一般透镜系统的光学耦合效率 g 由下式^[75]计算得出,

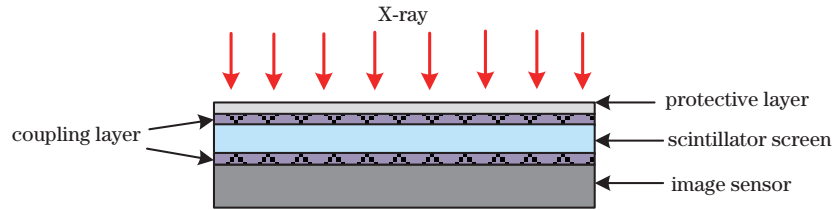
$$g = \tau \left[\frac{M}{2F(1+M)} \right]^2, \quad (3)$$

式中: τ 是光子通过所有光学透镜的传输效率; M 是透镜的放大倍数; F 是焦距与透镜直径的比值且等于 $1/(2NA)$ 。从(3)式可以看出,透镜的数值孔径和透镜传输效率越大,透镜的光耦合效率越高。因此,通常采用加反射镜以及设计高透光率、小像差的透镜组合系统的方式来提高 IXD 的分辨率和耦合效率^[23,32,74]。例如,为了提高 IXD 的耦合效率,Xie 等^[74]将 LuAG:Ce 闪烁体制备的闪烁屏和 sCMOS 图像传感器组成光学透镜耦合结构,他们通过优化光学透镜耦合系统的光路来提高 IXD 的透光效率,结果表明他们制备的 IXD 耦合效率提高到了 17% (约为商业 IXD 的 5 倍)。为了提高 IXD 的分辨率,Tous 等^[23]利用微焦点 X 射线管搭配超薄(约 5~20 μm)的 YAG:Ce 闪烁体和 CCD 图像传感器采用光学透镜耦合方式实现了亚微米级(0.7 μm)的空间分辨率的成像。为了实现了高速多光束 X 射实时成像,Shirasawa 等^[39]通过采用光学透镜耦合方式开发了一种多光束 IXD。他们成功地在 0.5 ms 内同时检测到了 9 幅空间分辨率为 70 μm 的投影图像。Desjardins 等^[32]采用光学透镜耦合方式开发了用于硬 X 射线同步加速器应用的紧凑、高效的 IXD。该探测器用电润湿液体透镜代替了传统的管透镜,研究表明其空间分辨率高达 415 lp/mm,可用于 X 射线显微断层成像。

采用光学透镜耦合方式制作的 IXD 具有高空间分辨率、高灵敏度、系统设计灵活及应用范围广等优点,但它同时存在耦合效率低、图像失真、成本高、体积大且系统易受杂散光干扰等问题。由(2)式可以看出,IXD 的空间分辨率主要受闪烁体厚度、光学透镜系统的 NA、光学系统的焦深和像差等因素的影响。为进一步提高 IXD 的性能,可通过增大光学透镜直径、采用像素化结构的闪烁屏、设计大 NA 和长工作距离的光学透镜系统等方式进行研究。

4.3 直接耦合方式

直接耦合方式的结构如图 11 所示,通常直接耦合的方法主要有粘贴固定法和直接沉积法^[25-26,38]。粘贴固定法是将单独加工好的闪烁屏(如 GOS:Tb 闪烁屏)与图像传感器进行机械性连接(如用耦合胶粘贴)压紧固定^[76]。这种耦合方式的生产难度比较小,成本也相对较低,但耦合胶、残留空气或缝隙等因素会造成光能的损失,进而影响 IXD 的分辨率。直接沉积法是利用物理气相法将闪烁体(如

图 11 直接耦合方式的结构^[40]Fig. 11 Structure of direct coupling mode^[40]

CsI:Tl)直接沉积到图像传感器的光敏区域形成薄膜^[25]。由于这种耦合方法没有额外的基板和黏合剂或空气层,因而光能损失较小,分辨率更高,但它的技术难度高,成本高。在直接耦合方式结构的 IXD 中,一般采用 CsI:Tl 或 GOS:Tb 闪烁体制备闪烁屏,图像传感器常选择 CMOS 图像传感器。

具有直接耦合结构的 IXD 主要应用于医学诊断,如牙科和乳腺 X 射线成像。直接耦合方式制作的 IXD 受 X 射线辐射影响较大,因而常用抗辐射性能更好的 CMOS 图像传感器取代 CCD 图像传感器。它通过采用大像素尺寸(22.5~100 μm)的 CMOS 图像传感器来保证相对较大的成像面积,但这同时会牺牲其空间分辨率。为了提高 IXD 的空间分辨率,Cha 等^[44]将像素化结构的 CsI:Tl 闪烁屏与 CMOS 图像传感器进行直接耦合,研制出了较高分辨率(6 lp/mm)的 IXD。为了在大能量范围内同时检测具有高空间和能量分辨率的高能 X 射线,Schlosser 等^[76]通过将 CCD 图像传感器与 CsI:Tl 闪烁体进行直接耦合,结果表明他们实现了在 1 keV 以下、100 keV 以上范围内的能量色散区域探测。为提高对硬 X 射线的探测效率,陆波等^[24]通过设计了具有直接耦合结构的 IXD,实现了对硬 X 射线的高分辨率

成像探测,并以镍准直器为成像目标进行了实验验证。Heo 等^[7]采用直接耦合方式在 CMOS 图像传感器上研制出了易于商业化和成本效益高的 CsPbBr₃ 钙钛矿型 IXD,他们证明了钙钛矿闪烁体可以为下一代工业读出电子和医学诊断提供巨大的潜力。

采用直接耦合方式制作的 IXD 具有耦合效率高、结构紧凑、无图像失真、体积小、高 DQE 和成像速度等优点,但它同时存在成像面积小、分辨率不高、应用范围受限、辐射损伤、制备工艺和成本要求高等问题。要实现高空间分辨率成像技术的突破,其核心问题是提高图像传感器小像素的感光效率、降低噪声及耦合工艺要求。目前,在商业化的平板探测器中常采用直接耦合方式,如目前发展迅速的 CMOS 平板探测器。随着直接耦合方式制备工艺的提升,研制出高性能、大面积、低成本的直接耦合方式的 IXD 将具有巨大的市场应用前景。

4.4 不同耦合方式结构的 IXD 的性能比较

总的来说,影响 IXD 性能的因素主要包括闪烁屏的材料和结构、图像传感器的性能、闪烁屏与图像传感器的耦合方式及制备工艺等。为了更好地对前述 IXD 的不同耦合方式的特点进行说明,表 3 对比了采用不同耦合方式研制的 IXD 的性能。

表 3 不同耦合方式研制的 IXD 的性能比较

Table 3 Performance comparison of IXD with different coupling modes

Performance index	Coupling mode of optical fiber	Coupling mode of optical lens	Direct coupling mode
Coupling efficiency	High	Low	High
Spatial resolution	Medium	High	Medium
Imaging area	Medium	Smaller	Small
Detector volume	Small	Large	Smaller
Production cost	Low	High	Medium
System structure	Simple	Complex	Simple

5 结束语

本文重点介绍了 IXD 中闪烁屏的材料和结构特点以及图像传感器的结构和研究现状,并对光纤耦合方式、光学透镜耦合方式及直接耦合方式的结

构和特点进行了说明和总结。在 IXD 中,除了使用传统闪烁体外,同时也在不断探索综合性能优良的新型高效闪烁体。通过采用制备像素化结构的闪烁屏和优化闪烁屏厚度等方式可进一步有效提升 IXD 的成像性能。近年来,使用性能优异的 CMOS

图像传感器和 sCMOS 图像传感器来替代 CCD 图像传感器的趋势日益明显。闪烁屏与图像传感器之间的 3 种耦合方式各有优缺点,其探测性能正在不断提升。在实际应用中,IXD 的研制需要合理选择制备闪烁屏的闪烁体材料和图像传感器,结合不同耦合方式,以达到最佳的成像效果和成本效益。

随着各应用领域对 X 射线成像要求的不断提高,高性能(包括高分辨率、高灵敏度、高速实时成像、大成像视场、优异的稳定性和可靠性等)、便携式、小型化、多功能、智能化的 IXD 将是未来发展的趋势。对于 IXD 未来的研究方向将围绕以下几个方面展开:

1) 闪烁屏方面

除了进一步解决传统闪烁体大面积薄膜制备困难、生产条件苛刻、存在粉末团聚现象、发光效率有限等问题,弥补新型闪烁体材料存在的缺陷,进而提高其稳定性和性能将是未来的重点研究方向。其中,新型卤化物钙钛矿闪烁体存在的稳定性和毒性问题^[9]、铀基闪烁体存在的大尺寸制备困难和辐射问题^[10]、新型玻璃闪烁体存在的光输出较低和微晶相的体积分数受限的问题^[11]等都是需要解决的关键问题。此外,后续可通过提高更小像素尺寸的像素化结构闪烁屏的光输出以及改进其制备工艺,优化光纤耦合方式和直接耦合方式结构中闪烁屏的厚度,从而提升 IXD 的综合性能。

2) 图像传感器方面

为制作能够满足更高 X 射线成像要求的 IXD,未来需研制出同时具备高分辨率、大面阵、高灵敏度、低噪声、宽动态范围、高帧速率、优异的抗辐射性能、低成本等特性的图像传感器。电子集成电路技术和半导体制造工艺未来的进一步发展将会为改善图像传感器的性能提供巨大的潜力。FPN 校正算法、噪声抑制电路设计、多层堆栈式技术以及像素重排技术等^[58-60,63-64]是进一步提升图像传感器综合性能的重点研究方向。此外,在图像传感器像素内集成存储和人工智能运算单元,使其能够完成一些高级图像处理算法,实现多功能和智能化将是未来研究的方向之一。

3) 闪烁屏与图像传感器的耦合方式方面

受光纤制备工艺及其质量的限制,目前采用光纤耦合方式研制的 IXD 成像视场较小,这限制了其应用范围和探测效率。采用多 FOT 或 FOP 阵列结构的方式能够实现大视场成像,但实现更高的耦合

工艺水平以及图像拼接处理技术将是未来需要解决的关键问题。光学透镜耦合方式亟待解决的关键问题是耦合效率的提升,结合图像视觉和深度学习研究领域新的高效算法,将会进一步提高 X 射线显微层析成像的图像质量。改善耦合制作工艺以及提高结构稳定性是直接耦合方式未来的重要研究方向。此外,研究不同耦合方式性能影响因素的内在机制,建立更加完善的理论模型,对于深入理解和研究综合性能更加优异的 IXD 将有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang H Y, Li Y X, Cao B, et al. Advances in X-ray imaging technology[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2020, 50(11): 1202-1212.
张弘毅, 李运祥, 曹斌, 等. X 射线成像技术的研究进展[J]. *中国科学: 生命科学*, 2020, 50(11): 1202-1212.
- [2] Gong Y X, Yu Z J, Wang J J. Application of X-ray 3D imaging in the field of battery materials research [J]. *Chemistry*, 2020, 83(4): 349-355.
巩宇新, 于振江, 王家钧. X 射线成像技术在能源材料研究中的应用[J]. *化学通报*, 2020, 83(4): 349-355.
- [3] Chen Z Q, Zhang L, Jin X. Recent progress on X-ray security inspection technologies[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(13): 1350-1365.
陈志强, 张丽, 金鑫. X 射线安全检查技术研究新进展[J]. *科学通报*, 2017, 62(13): 1350-1365.
- [4] 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.
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.
- [5] Miao Q, Wang G, Li Y J. Development progresses of X-ray detectors[J]. *Sensor World*, 2015, 21(10): 7-13.
苗青, 王高, 李仰军. X 射线成像探测器发展进展[J]. *传感器世界*, 2015, 21(10): 7-13.
- [6] Hartmann W, Markewitz G, Rettenmaier U, et al. High-resolution direct-display X-ray topography[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 27(5): 308-309.
- [7] Heo J H, Shin D H, Park J K, et al. High-performance next-generation perovskite nanocrystal scintillator for nondestructive X-ray imaging[J]. *Advanced Materials*, 2018: e1801743.
- [8] Chen Q S, Wu J, Ou X Y, et al. All-inorganic

- perovskite nanocrystal scintillators[J]. *Nature*, 2018, 561(7721): 88-93.
- [9] Zhou F G, Li Z Z, Lan W, et al. Halide perovskite, a potential scintillator for X-ray detection[J]. *Small Methods*, 2020, 4(10): 2000506.
- [10] Wang Y M, Wang Y X, Yin X M, et al. Research progress on uranyl-bearing X-ray scintillator[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2019, 41(4): 342-348.
王玉民, 王亚星, 尹雪苗, 等. 铀基 X 射线闪烁体研究进展[J]. *核化学与放射化学*, 2019, 41(4): 342-348.
- [11] Lü S C, Zhou S F, Tang J Z, et al. Research progress in development of glass scintillator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148011.
吕时超, 周时凤, 唐俊州, 等. 玻璃闪烁体的研究进展[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148011.
- [12] Gouveia L C P, Choubey B. On evolution of CMOS image sensors[J]. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2020, 7(5): 1-6.
- [13] Moomaw B. Camera technologies for low light imaging: overview and relative advantages[J]. *Methods in Cell Biology*, 2013, 114: 243-283.
- [14] Liu L N, Xue B, Wei H, et al. Application of two new image detectors in living cell imaging system[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2019, 28(6): 513-517.
刘丽娜, 薛冰, 魏华, 等. 活细胞成像系统中两种新图像传感器及其应用[J]. *激光生物学报*, 2019, 28(6): 513-517.
- [15] Wang W X, Ling Z X, Zhang C, et al. Characterization of a BSI sCMOS for soft X-ray imaging spectroscopy[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14(2): P02025.
- [16] Han Y P, Li R H, Han Y. X-ray detector coupling method based on advanced fiber optics taper[J]. *Journal of Detection & Control*, 2015, 37(3): 15-19.
韩跃平, 李瑞红, 韩焱. 基于光锥的 X 射线探测器耦合方法[J]. *探测与控制学报*, 2015, 37(3): 15-19.
- [17] van Silfhout R G, Kachatkou A S. Fibre-optic coupling to high-resolution CCD and CMOS image sensors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, 597(2/3): 266-269.
- [18] Uesugi K, Hoshino M, Takeuchi A. Introducing high efficiency image detector to X-ray imaging tomography[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 849: 012051.
- [19] Xie H L, Du G H, Deng B, et al. Study of Scintillator thickness optimization of lens-coupled X-ray imaging detectors[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 11(3): C03057.
- [20] 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.
- [21] Wang Y P, Li G, Zhang J, et al. Improving the detection efficiency and modulation transfer function of lens-coupled indirect X-ray imaging detectors based on point spread functions simulated according to lens performance parameters[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(4): 1093-1105.
- [22] Zhang Y X, Xie H L, Du G H, et al. Influence of scintillator's thickness on imaging quality of lens-coupled hard X-ray imaging detector[J]. *Nuclear Techniques*, 2014, 37(7): 9-14.
张永兴, 谢红兰, 杜国浩, 等. 基于透镜耦合的 X 射线成像探测器闪烁体厚度对成像质量的影响[J]. *核技术*, 2014, 37(7): 9-14.
- [23] Tous J, Parizek J, Blazek K, et al. Resolution limits of a single crystal scintillator based X-ray micro-radiography camera[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15(2): C02014.
- [24] Lu B, Wang Y S, Yang Y J, et al. Hard X-ray imaging based on CCD and CsI scintillator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(11): 2865-2871.
陆波, 王于仁, 杨彦信, 等. 基于 CCD 和 CsI 闪烁体的硬 X 射线成像[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(11): 2865-2871.
- [25] Cha B K, Kim C R, Jeon S, et al. X-ray characterization of CMOS imaging detector with high resolution for fluoroscopic imaging application[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 731: 315-319.
- [26] Koukou V, Martini N, Valais I, et al. Resolution properties of a calcium tungstate (CaWO_4) screen coupled to a CMOS imaging detector[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 931: 012027.
- [27] Li X K, Qiu G M, Qiu T, et al. Progress in scintillation materials[C]//The First Youth Academic Conference of China Rare Earth Society. Beijing: The Chinese Society of Rare Earths, 2005, 23: 37-45.
李喜坤, 邱关明, 丘泰, 等. 闪烁材料研究进展[C]//中国稀土学会第一届青年学术会议论文集. 北京: 中国稀土学会, 2005, 23: 37-45.

- [28] Li J, Chen X P, Kou H M, et al. Recent development on garnet single crystal and ceramic scintillators[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(1): 116-127.
李江, 陈肖朴, 寇华敏, 等. 石榴石闪烁材料的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(1): 116-127.
- [29] Yang Y, Shang S S, Chen Y L, et al. Review of inorganic scintillation materials[J]. Materials Review, 2016, 30(S2): 87-91.
杨熠, 尚珊珊, 陈艳林, 等. 无机闪烁材料研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(S2): 87-91.
- [30] Weber M J. Inorganic scintillators: today and tomorrow[J]. Journal of Luminescence, 2002, 100(1/2/3/4): 35-45.
- [31] Ren G H, Yang F. The research history and present situation of some halide scintillation crystals[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(11): 1149-1164.
任国浩, 杨帆. 卤化物闪烁晶体的研究历史和现状[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(11): 1149-1164.
- [32] Desjardins K, Medjoubi K, Dennetiere D. Imaging performances of an in-house compact high spatial resolution X-ray detector based on electrowetting liquid lens[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(8): P08014.
- [33] Cha B K, Kim J Y, Kim T J, et al. Fabrication and imaging characterization of high sensitive CsI(Tl) and Gd₂O₂S(Tb) scintillator screens for X-ray imaging detectors[J]. Radiation Measurements, 2010, 45(3/4/5/6): 742-745.
- [34] Tous J, Horodysky P, Blazek K, et al. High resolution low energy X-ray microradiography using a CCD camera[J]. Journal of Instrumentation, 2011, 6(1): C01048.
- [35] Choi C H, Kim H T, Choe J Y, et al. *In vivo* high-resolution synchrotron radiation imaging of collagen-induced arthritis in a rodent model[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2010, 17(3): 393-399.
- [36] Douissard P A, Cecilia A, Rochet X, et al. A versatile indirect detector design for hard X-ray microimaging[J]. Journal of Instrumentation, 2012, 7(9): P09016.
- [37] Seo C W, Kyung Cha B, Jeon S, et al. Characterization of indirect X-ray imaging detector based on nanocrystalline gadolinium oxide scintillators for high-resolution imaging application[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 699: 129-133.
- [38] Michail C M, Seferis I E, Sideras T, et al. Image quality assessment of a CMOS/Gd₂O₂S: Pr, Ce, F X-ray sensor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 637: 012018.
- [39] Shirasawa T, Liang X Y, Voegeli W, et al. High-speed multi-beam X-ray imaging using a lens coupling detector system[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(7): 077002.
- [40] Guo L N. Research on key technologies of X-ray imaging detection[D]. Chendu: University of Electronic Science and technology, 2018:8-36.
郭丽娜. X射线成像探测的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 8-36.
- [41] Guo L N, Liu S, Chen D J, et al. Fabrication and performance of micron thick CsI(Tl) films for X-ray imaging application[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(3): 1827-1831.
- [42] Cha B K, Kim J Y, Kim T J, et al. Investigation of the performance of scintillator-based CMOS flat panel detectors for X-ray and thermal neutron imaging [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(3): 1409-1413.
- [43] Sahlholm A, Svenonius O, Petersson S. Scintillator technology for enhanced resolution and contrast in X-ray imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 648: S16-S19.
- [44] Cha B K, Kim B J, Cho G, et al. A pixelated CsI (Tl) scintillator for CMOS-based X-ray image sensor [C]//2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, October 29-November 1, 2006, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006: 1139-1143.
- [45] Yao D L, Gu M, Liu X L, et al. Fabrication and performance of CsI(Tl) scintillation films with pixel-like columnar-matrix structure[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(3): 699-703.
- [46] Svenonius O, Sahlholm A, Wiklund P, et al. Performance of an X-ray imaging detector based on a structured scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009, 607(1): 138-140.
- [47] Cha B K, Lee D H, Kim B, et al. High-resolution X-ray imaging based on pixel-structured CsI:Tl scintillating screens for indirect X-ray image sensors

- [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2011, 59(6(1)): 3670-3673.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Koch A, Raven C, Spanne P, et al. X-ray imaging with submicrometer resolution employing transparent luminescent screens[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(7): 1940-1951.
- [51] Zhu Q X. CCD imaging detector[J]. Modern Physics, 2009, 21(6): 8-11.
朱耆祥. CCD 成像探测器[J]. 现代物理知识, 2009, 21(6): 8-11.
- [52] Yao L B. Low-light-level CMOS image sensor technique[J]. Infrared Technology, 2013, 35(3): 125-132.
姚立斌. 低照度 CMOS 图像传感器技术[J]. 红外技术, 2013, 35(3): 125-132.
- [53] Zhang Y T, Chai M Y, Sun D X, et al. Digital TDI technology based on global shutter sCMOS image sensor for low-light-level imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0911001.
张元涛, 柴孟阳, 孙德新, 等. 全局快门 sCMOS 图像传感器数字 TDI 微光成像技术[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0911001.
- [54] Wang S H, Chen Y J, Liu B. A review of the development of CCD and CMOS technology at home and abroad[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2017(13): 112-114.
王世和, 陈远金, 刘彬. CCD 与 CMOS 国内外技术发展综述[J]. 内燃机与配件, 2017(13): 112-114.
- [55] Wang X D, Ye Y T. Comparative research and future tendency between CMOS and CCD image sensor[J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(11): 178-181.
王旭东, 叶玉堂. CMOS 与 CCD 图像传感器的比较研究和趋势[J]. 电子设计工程, 2010, 18(11): 178-181.
- [56] Song M, Kuai X K, Zheng Y R. Comparison of detection performance in CCD and CMOS image sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(1): 5-9.
宋敏, 邹新凯, 郑亚茹. CCD 与 CMOS 图像传感器探测性能比较[J]. 半导体光电, 2005, 26(1): 5-9.
- [57] Yao P P, Sun L, Xu S L, et al. Design of a scientific-grade CCD refrigeration system and analysis of its thermal characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1704001.
姚萍萍, 孙亮, 许孙龙, 等. 科学级 CCD 制冷系统设计及其温度特性分析[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1704001.
- [58] Liu R K, Xing D Z, Tang Z H, et al. An overview of low noise CMOS image sensor technique[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(6): 768-773.
刘嵘侃, 邢德智, 唐昭焕, 等. 低噪声 CMOS 图像传感器技术研究综述[J]. 半导体光电, 2020, 41(6): 768-773.
- [59] Guo H. Development and trend of CMOS sensor technology[J]. China Security & Protection, 2015(10): 7-10.
郭辉. CMOS 传感器技术的发展与走势[J]. 中国安防, 2015(10): 7-10.
- [60] Wang S W, Zhang G X, Xu W, et al. Adaptive moving window-based non-uniformity correction of CMOS image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1401003.
王士伟, 张贵祥, 徐伟, 等. 基于自适应移动窗口的 CMOS 图像非均匀性校正[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1401003.
- [61] Mittone A, Manakov I, Broche L, et al. Characterization of a sCMOS-based high-resolution imaging system[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2017, 24(6): 1226-1236.
- [62] Li J. A highly reliable and super-speed optical fiber transmission for hyper-spectral sCMOS camera[J]. Optik, 2016, 127(3): 1532-1545.
- [63] Zhang Y T, Cao K Q, Sun D X, et al. Low light level detection based on scientific CMOS image sensor with high sensitivity and low noise[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080401.
张元涛, 曹开钦, 孙德新, 等. 高灵敏度低噪声科学级 CMOS 图像传感器微光探测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080401.
- [64] Bai H, Yang Y M, Liu Y, et al. Adaptive detection and correction of fixed pattern noise in sCMOS cameras[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology, September 19, 2018, Tianjin China. New York: ACM, 2018: 107-111.
- [65] Xin F X. Optical fiber coupling technique of ICCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(3):

- 210-213.
幸福学. ICCD 的光纤耦合技术[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 210-213.
- [66] Song Y, Zhou M, Song G Z, et al. Application of X-ray CCD camera in X-ray spot diagnosis of rod-pinch diode[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(4): 759-764.
宋岩, 周鸣, 宋顾周, 等. X-ray CCD 相机在杆箍缩二极管 X 射线焦斑诊断中的应用[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(4): 759-764.
- [67] Wang W Y, Ionita C, Huang Y, et al. Region-of-interest micro-angiographic fluoroscope detector used in aneurysm and artery stenosis diagnoses and treatment [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8313: 831317.
- [68] Panse A S, Jain A, Wang W, et al. High resolution emission and transmission imaging using the same detector[C]//IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference, October 30-November 6, 2010, Knoxville, TN, USA. New York: IEEE Press, 2010: 3372-3375.
- [69] Vasan S N S, Sharma P, Ionita C N, et al. Image acquisition, geometric correction and display of images from a 2×2 X-ray detector array based on electron multiplying charge coupled device (EMCCD) technology[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8668: 86685J.
- [70] Zhao Z G, Wang R, Lei Y H, et al. Fine adjustable non-glued fiber optic taper array coupled digital X-ray detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(5): 0504001.
赵志刚, 王茹, 雷耀虎, 等. 可微调非粘结光锥阵列耦合数字 X 射线探测器[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 0504001.
- [71] Su B. Research on coupling technology of CCD and light cone[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011: 6-28.
苏彬. CCD 与光锥的耦合技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2011: 6-28.
- [72] Thompson A C, Westbrook E M, Lavender W M, et al. A large area CMOS detector for shutterless collection of X-ray diffraction data[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 493: 012019.
- [73] Li X F, Li L, Deng H B, et al. Study on light transmission characteristics of fiber optic faceplate and fiber optic taper[J]. Infrared Technology, 2014, 36(8): 617-623.
李晓峰, 李莉, 邓华斌, 等. 光纤面板及光锥传像特性研究[J]. 红外技术, 2014, 36(8): 617-623.
- [74] Xie H, Luo H, Du G, et al. High-efficiency fast X-ray imaging detector development at SSRF[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2019, 26(5): 1631-1637.
- [75] Maidment A D A, Yaffe M J. Analysis of signal propagation in optically coupled detectors for digital mammography: II. lens and fibre optics[J]. Physics in Medicine and Biology, 1996, 41(3): 475-493.
- [76] Schlosser D M, Huth M, Hartmann R, et al. Direct and indirect signal detection of 122 keV photons with a novel detector combining a pnCCD and a CsI(Tl) scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 805: 55-62.