

摘要：X 射线摄像探测器随着相关科技的发展，各方面的性能及综合水平都取得了巨大的进展。简单介绍了早期 X 射线成像探测器，对现阶段的主要应用放射成像探测器—直接数字 X 摄影探测器做了详细介绍，并对国内外研究作了概述。最后对 X 射线摄影系统发展趋势进行了展望。

关键词：X 射线胶片；计算机 X 射线成像；平板探测器；直接数字化 X 射线成像

中图分类号：TL816+.1 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2015)10-0007-07

收稿日期：2015-09-17

X 射线成像探测器发展进展

苗青¹ 王高² 李仰军²

1. 中北仪器科学与动态测试教育部重点实验室，山西太原 030051

2. 中北大学电子技术测试国家重点实验室，山西太原 030051

一、引言

德国物理学家伦琴于 1895 年发现了 X 射线，该电磁波具有波长短（0.01nm ~ 10nm）、穿透力强等特性，可穿过大量对可见光不透明的物体，通过得到的 X 射线图像获取物体内部的信息。最初的 X 射线成像工具是 X 射线胶片，最早应用于医疗检查中。由于不同的组织器官对 X 射线吸收能力不同，因而 X 射线穿过人体后在胶片上形成了对比度不同的影像，曝光后的图像可用于辅助医学诊断。

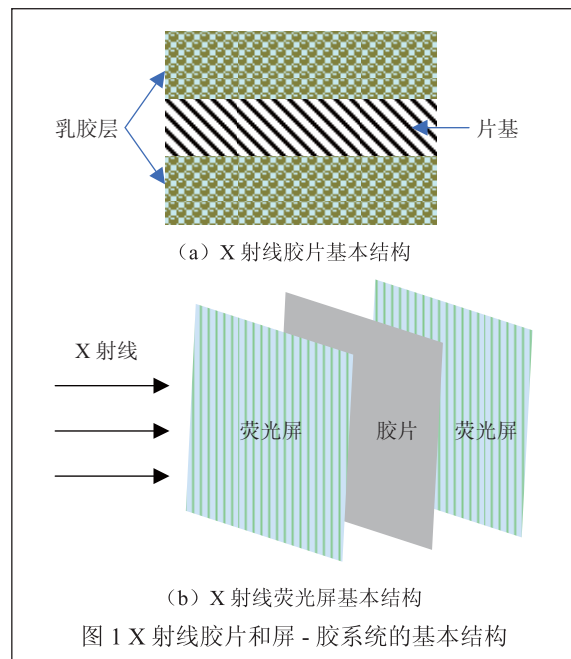
随着对 X 射线成像应用要求的提高以及相关技术的发展，X 射线图像探测器也发生了相应的变革。从开始的 X 射线胶片、X 射线荧光屏，八十年代的计算机 X 射线成像（CR），到目前技术成熟并且已经广泛应用的数字平板探测器，X 射线图像探测器取得了巨大的进步^{[1][2]}。近几十年的数字化技术、新材料和大规模半导体集成电路制造技术的快速发展，对 X 射线图像探测器的进步带来了前所未有的推动作用。

X 射线图像探测在医学检查、无损检测、科学研究等领域获得了全方位的应用，同时，对 X 射线图像探测器更广泛的研究仍在进行中。本文简要介绍了早期的 X 射线探测成像工具，并对近年来发展迅速的数字 X 射线探测器做了详细叙述，最后对 X 射线图像

探测器的发展进行了展望。

二、早期 X 射线成像

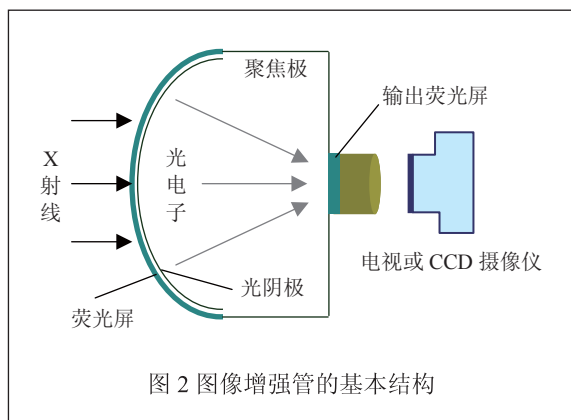
X 射线胶片是最早的 X 射线成像系统，最初是作为医学诊断的基本工具。X 射线胶片主要由片基和感光乳胶层构成，如图 1（a）所示。乳胶涂层由混以明



胶的卤化银微晶颗粒构成，X 光照射下，卤化银分解产生潜影，经过化学显影、定影等处理后得到了可见的 X 射线图像。X 射线胶片对 X 射线吸收率非常低，仅能达到 1% ~ 2%。X 射线胶片的图像分辨率较好、保存时间长且价格低廉，上世纪一直作为基本的 X 射线成像工具使用^{[1][2]}，但由于其 X 射线利用率非常低、无法实时成像等问题，已渐渐被其它成像手段取代。

X 射线荧光屏也曾作为医学诊断的主要工具。一般采用荧光屏 - 胶片结构，如图 1 (b) 所示，使用涂有感光乳剂的胶片，利用荧光屏增大胶片的感光度。荧光屏最早采用广泛使用的钨酸钙粉末，将钨酸钙粉末与透明的粘结剂混合在玻璃板上形成 X 射线荧光屏。X 射线透射时，可产生强度分布的可视磷光图像^[2]。闪烁荧光屏的应用提高了 X 射线转换率，减少了所需照射剂量，但仍需化学显影、无法实时数字化成像等问题仍未得到解决。

20 世纪 50 年代出现的图像增强管，通过与电视摄像机结合，首次实现了实时成像。由输入荧光屏、输出荧光屏、阴极、阳极和聚焦极构成的真空管，基本结构如图 2 所示。图像增强管前窗内壁的荧光屏和光阴极共同作用将 X 射线转换为光电子，电子在高压电场的作用下聚集到输出荧光屏上，经过这一过程，输出的可见光可增加几十倍到几万倍，通过摄像器将图像拍摄下来进行动态显示。尽管图像增强管可实时成像，但它体积庞大，视域的边缘失真，限制了成像区域，并且图像空间分辨率、对比度不足，保存图像资料仍然使用胶片^{[1][2]}。



三、计算机 X 射线成像

20 世纪 80 年代初在影像存储板 (image plate) 的基础上，出现了计算机 X 射线成像技术，首次实现了 X 射线成像的数字化。这是一种间接式的 X 射线数字成像技术。

计算机 X 射线成像 (computed radiography, 即 CR) 通过将传统方法与现代技术相结合，采用成像板代替胶片或荧光屏记录 X 射线，成像板上为可以在激发态下保存数小时的磷光材料，一般是稀土金属 Eu 活化的钡的卤族化合物制成，曝光后影像存储板由专用的激光扫描仪读出图像，之后可以由计算机对图像实现存储和处理。影像存储板可以重复使用，因此实际比胶片成本低，省去了化学显影，成像方式也更加方便，同时在灵敏度、动态范围等方面也得到了提高。

CR 技术实现了对 X 射线成像的计算机辅助、数字化成像，但存在其使用的局限性，如图像读出需要专门的激光扫描设备，存储图像需要高强度光束消除，无法实现实时成像，并且图像质量也比胶片稍差^[2]。

四、数字 X 射线探测器

20 世纪 90 年代出现的直接数字化 X 射线成像技术 (Direct Radiography 或 Direct Digital Radiography, 即 DR 或 DDR) 是真正的实时数字化成像，已经实现全身透视成像。按照探测器结构可分为基于图像传感器和基于 TFT 晶体管阵列的数字射线摄影系统。DR 探测器可以快速将探测到的 X 射线转化为数字信号输出，无需 CR 中的专用读出设备，不必更换胶片或影像存储板，提高了工作效率，节约了胶片或显影用品，减少了照射剂量，图像易于传输、存储和处理。DR 系统相比屏 - 胶组合和 CR 系统具有高图像质量、快速成像、低辐射度的优点。

1、基于图像传感器的探测器

电荷耦合器件 CCD (Charge Coupled Devices) 和互补型氧化物金属半导体 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 是两类常用的图像传感器，可通过表面耦合的荧光屏对 X 射线进行光电转换。理论上可直接与荧光屏耦合拍摄成像，但受限于制作技术和成本，传感器面积不易做大，而且 X 射线的探测

效率较低，只适于小面积成像^[2]。图像传感器可通过透镜、光纤光锥等光学器件的耦合实现了大面积闪烁层与小面积图像传感器的光学匹配^{[1][3][4]}。

(1) 性能比较

CCD 中电路占像素的面积小，像素的感光性更好，在像素尺寸相同的情况下，CCD 的灵敏度更高。CCD 的主要噪声在最高带宽产生^[5]。CMOS 图像传感器早期与 CCD 相比性能一直处于劣势，主要因为所需的放大和控制电路需要占据硅片的面积，采光的有效面积就相应的减少了，以及制作工艺技术的限制，在灵敏度、分辨率、填充系数等方面逊于 CCD。多源噪声对 CMOS 图像传感器造成了使用的局限性，尤其在低照度、视频应用中^[2]。

由于数据读出方式不同，CMOS 可以更快地读取传输数据，读取速率可达 1000Mpixels/s。CCD 需要 3~4 个不同的电源，CMOS 只需一个电压供电，并且 CMOS 功耗低，仅约为 CCD 的 1/10。制作工艺上，CMOS 采用标准的半导体制造工艺，同时可以将控制和信号处理电路集成于一个芯片上，具有高集成性。而 CCD 需要高纯度硅基板，不能用普通的硅半导体集成电路芯片的生产设备和工艺，不但成本高，而且集成度低^{[2][5-7]}。

CCD 与 CMOS 相比具有分辨率高、灵敏度高、噪声小等优点，CMOS 则具有读取速度快、集成度高、功耗低、成本低等优点。

(2) 性能改善及发展

分辨率与像元尺寸直接相关，CCD 像元尺寸一般在 7.5~24 μm ，现在的 CCD 像素已经达到了千万级以上^[6]。像素技术也不断改进，如富士公司的超级 CCD 采用八角形光电二极管，增加了像素单位面积以及光吸收效率，提高了 CCD 的分辨率、感光度。索尼推出的 ICX681SQW 小尺寸 CCD 传感器，像素尺寸仅为 1.43 μm ，有效像素达到 1420 万。2013 年，我国成功研制出像素高达 1 亿的相机 IOE3-Kanban，采用大面阵 CCD 芯片，分辨率达到 10240 \times 10240。

探测灵敏度可通过结构的改进、Binning 模式等提高。增强型 CCD (Intensified CCD, ICCD)、电子倍增 CCD (Electron-Multiplying CCD, EMCCD) 都具有

更高的探测灵敏度^{[6][8]}。Binning 模式通过将多个像元合并，提高了感光能力，从而改善了灵敏度。成像设备使用 Binning 模式，可提高弱光条件下的成像质量。

CCD 可通过结构和技术的改进提高读取速度。多通道技术的应用可使 CCD 实现高速读取信号。美国劳伦斯伯克利国家实验室在 SNAP CCD 技术和 SNAP 集成读出电路的基础上研发的 Fast CCD (快速 CCD)，像素 480 \times 480，像元面积 20 μm ，可达到最高 400fps 的帧频^[9]。

在消噪方面，CCD 可通过相关双采样法、反射延迟法、低通滤波等抑制噪声，其中相关双采样法是降噪的主要方法；通过对 CCD 制冷，可降低暗电流噪声^[6]；另外，通过数据图像处理也可降低噪声的影响。

近年来，CMOS 图像传感器发展迅速，成为图像传感器的研发热点。无源 CMOS (CMOS-PPS) 后发展的有源 CMOS 传感器 (CMOS-APS) 在动态范围、噪声、量子效率方面与 CCD 已具备可比性，图像质量和灵敏度也得到了提高。有源 CMOS 基础上还发展出对数 APS、CTIA (电容跨阻放大器) APS, CAPS (互补有源像素传感器) 等，在不同方面作了改进。最新发展的数字 CMOS (CMOS-DPS) 减少了固定噪声和读出噪声，结构的改进获得了更高的读取速度，连续读取可达到 10000fps^{[5][7][10-11]}。

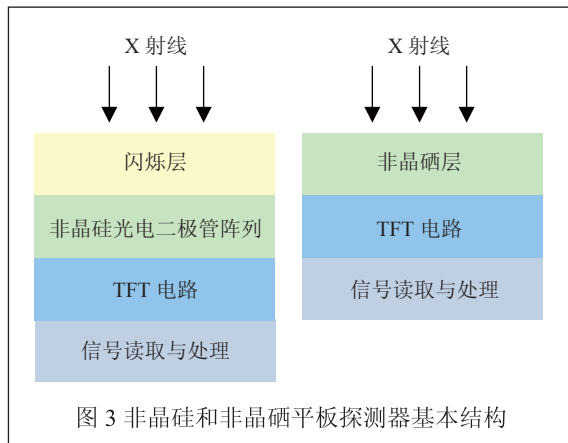
降噪和提高灵敏度是 CMOS 传感器提高性能的关键因素。相关双采样法可有效抑制固定模式噪声和复位噪声。CTIA APS 结构可降低固定噪声和读出噪声。采用线性读取可以改善固定噪声。针孔式或掩埋式光电二极管 (pinned or buried photodiode) 的使用可以减少像素噪声，消除暗电流。TFA (thin film on ASIC) 结构可提高灵敏度、动态范围^{[5][10]}。现代电路制作工艺的提高大大改进了 CMOS 像素结构的性能。

国外的 CMOS 专业制造公司有日本滨松 (HAMAMATSU)、OmniVision、Dexela 等，滨松的 C10900D 平板探测器为 CT 和全景成像研发，全景模式下像素为 1248 \times 1248，帧频达到 280fps，具有高速成像、高灵敏度、宽动态范围特性。美国 OmniVision 公司生产的 OV23850 型堆栈式 CMOS，像素尺寸仅为 1.12 μm ，达到 2.38Megapixels 像素 (5632 \times 4224)

的分辨率，帧速为 24fps，可实现 30fps 的视频拍摄。国内长春长光生产的 GMAX1205 型 CMOS 图像传感器，达到 6000 万像素的分辨率，全分辨率下 10fps，像元尺寸为 5.5 μm ，读出噪声仅为 2.9e⁻，由于采用了微透镜阵列，量子效率可达 64%。神州鑫图光的 Dhyana400A 科学 CMOS 相机，分辨率为 2048 \times 2048，全分辨率下 25fps 的帧频，动态范围高达 93dB，读出噪声仅为 1.5e⁻，能够满足对高性能图像传感器的应用需求。

2、基于 TFT 阵列的平板探测器

大面积平板探测器 (flat panel detector, 即 FPD) 在 20 世纪 90 年代实现商业化。目前数字平板探测器主要有非晶硅 (a-Si) 和非晶硒 (a-Se) 两类，基本结构如图 3 所示。由闪烁屏、非晶硅光二极管阵列或非晶硒层完成 X 射线转换，形成的电信号经 TFT (thin film transistor 薄膜晶体管) 电路放大输出，信号数字化后送至计算机。非晶硅平板探测器需由闪烁层将 X 射线转换为可见光，再由非晶硅光二极管转换为电荷信号，而非晶硒平板探测器的非晶硒层可直接将 X 射线转换为电荷信号^{[2][12-14]}。



非晶硅平板探测器主要由闪烁层、非晶硅光敏二极管阵列、TFT 控制电路、读出控制电路和玻璃衬底等组成。闪烁荧光层主要是掺铯碘化铯针状 (CsI:Tl) 晶体或掺铽硫化钨 (Gd₂O₃S:Tb) 陶瓷闪烁体，闪烁层的材料、工艺会影响探测器的量子探测效率 (DQE)。非晶硅对放射线的伤害免疫，因此是理想的 X 射线接收材料^{[2][15]}。

非晶硒平板探测器主要由非晶硒层、TFT 阵列、读出控制电路和玻璃衬底等组成。硒原子序数比硅高，理论上应比非晶硅探测器探测效率更高，但实际的电荷收集有限，而且需要很强的电场，高电压对于 TFT 电路很危险，同时会产生较大噪声。因此，与非晶硅平板探测器相比并没有特别的优势。硒板对温度非常敏感，使用条件方面也受到一定限制^[2]。

TFT 阵列可制作成与闪烁涂层一样大，中间没有光子损失，而图像传感器无法制作成与闪烁层一样大，因此图像传感器型探测器 DQE 值会逊于非晶硅平板探测器。非晶硒平板探测器省去了中间转换过程，没有散射的影响，具有较好的 DQE 值和空间分辨率。

量子探测效率决定了平板探测器对不同组织密度差异的分辨能力，空间分辨率决定了对组织细微结构的分辨能力。非晶硅探测器具有相对更高的 DQE 值，因此在对密度分辨率要求比较高时，适宜采用非晶硅平板探测器，所得图像对比度较高；MTF 反映成像系统重现细节的能力，非晶硒探测器具有最优的 MTF 值，因此对细节分辨率要求比较高时，如对关节、乳腺的成像，适宜采用非晶硒平板探测器，可获得空间分辨率更高的图像^[16]。

临床应用中，在低细节对比上（如胸椎），非晶硅平板探测器要好一些；在小的对比细节上（如小的钙化灶），非晶硒平板探测器会更清晰一些。从图像质量来说，二者表现相当。在照射最小剂量方面，非晶硒为 3.10mAs，非晶硅为 1.25mAs，在减少病人所辐射剂量方面，非晶硅更具有优势^[17]。

五、数字 X 射线摄影系统比较及发展

1、CR 和 DR 的比较

CR 系统可以与原有 X 光机设备直接匹配，无须改装，可多台设备共用一套 CR 系统，临床应用中，CR 可配合普通 X 线机、床边机等灵活使用，设备成本低，使用灵活、经济。CR 系统应用广泛，但其时间分辨率较差、不能实时显示，对于动态成像的需求难以满足。

DR 为真正意义上的数字实时成像技术，成像综合水平远远超过 X 胶片。临床上，与 CR 相比成片甲

级片率高，图像质量更高，更利于辅助诊断，成像速度快，照射剂量低，DQE值为CR系统的两倍甚至更高，量子探测效率可达60%以上，具有更高的信噪比、工作效率。但DR系统不能与原有系统兼容，发生损坏需要整体更换，成本较高^[18]。

2、DR系统的发展

随着技术及设备的完善成熟，DR已经在世界范围得到的广泛的应用。国外DR生产厂商主要有西门子(Siemens)、GE、Philips(飞利浦)、Hologic、佳能、岛津(Shimadzu)等，国内厂商有北京万东、鱼跃、沈阳东软、德润特、新医科技等。主流DR是非晶硅型，生产商有西门子、GE、Philips、佳能、万东等；Hologic主要是非晶硒型DR，岛津、德润特、新医科技等有该类型DR；发展CCD型DR的有SwissRay、加拿大IDC、韩国Raysis、沈阳东软等；发展CMOS型DR的有DALSA、CaresBuilt、Tradix等。

西门子的DR产品核心部件都是自制，具有很高的匹配度，使用的是Trixell平板探测器，分辨率高，图像质量好。平板探测器有AXIOM Aristos系列、AXIOM Multix M、MOBILETT XP、乳腺机MAMMOMAT1000等。AXIOM Aristos系列具有不同的使用范围和功能特点，如AXIOM Aristos VX用于胸部和骨骼的X线检查，配备有悬吊球支架和可倾斜检测器，大部分检查可自动完成。在探测器中配置的西门子滤线栅，比常规滤线栅增加了20%透过率，降低了照射剂量。2008年，在中国推出的MOBILETT XP

是一款移动式X射线诊断设备(如图4(a)所示)，适于患者床旁X射线检查。

GE是全球DR研发较早的医疗设备供应商，使用Perkin Elmer公司的平板探测器。采用零部件全球采购模式，部件匹配性略低。目前的DR产品有Definium 6000、Discovery XR650、XR 6000、数字乳腺机Senographe Crystal等。2006年推出的Definium 6000是一款移动型平板DR，将多种高级临床使用功能如双能成像、组织均衡等与数字平板技术结合，同时满足临床复杂摆位和高图像质量^[19]。2010年引进的Discovery XR650融合了先进的平板技术和GE的Discovery平台(如图4(b)所示)，对行动困难的患者无需移动可完成X线检查；“三维容积”的应用可获得感兴趣区域的容积影像，对任意层面观察，提高了病变检出率^[20]。

Philips最早建立DR品牌，采用Trixell平板探测器。DR产品有Essenta DR Compact、DigitalDiagnost、MicroDose SI、MobileDiagnost wDR等。2009年推出的Essenta DR Compact作为一款经济型DR，结合了UNIQUE图像处理软件，适用于中小型医院的临床应用，图像质量稳定可靠。2014年展出的MicroDose SI是全球首台量子乳腺X射线机，临床证实其实平均拍摄剂量可减少50%以上，实现了低剂量与高图像质量的融合。同时展出的MobileDiagnost wDR是一款可移动无线DR(如图4(c)所示)，检查灵活，便于传输数据，是全球首款触屏平板彩超。



图4 部分生产商的DR产品

以上对部分 DR 生产商进行了简介，表 1 为部分产品的性能基本参数。

表 1 DR 产品主要性能参数

企业	型号	平板探测器	分辨率	像素尺寸 (μm)	成像面积 (cm ²)
Siemens	AXIOM Aristos TX/VX/FX/MX	a-si	3K×3K	143	43×43
GE	Discovery XR650	a-si	2K×2K	200	41×41
Philips	Digital Diagnost	a-si	3K×3K	143	43×43
Hologic	Selenia	a-se	3328×4096	70	24×29
Canon	CXDI-40EC	a-si	2688×2688	160	43×43
IDC	X-Series	CCD	3K×3K 或 4K×4K	144 或 108	43×43
DALSA	Helios 10MD	CMOS	2560×2000	96	20×25
万东	新东方 1000CCD	CCD	4128×4128	108	43×43
万东	新东方 1000D	a-si	3K×3K	143	43×43
德润特	非晶硒悬吊式 DR	a-se	2560×3072	139	35×43
新医科技	Saturn 8000	a-si	3072×3072	140	43×43
江苏康众	CareView 500M	a-si	3072×2560	77	24×20

六、结论

DR 系统是目前主要的数字 X 线摄影系统的应用技术，经过十几年的发展，直接数字摄影系统在成像质量、速度、辐照剂量等性能的优越性，正在逐步取代计算机 X 射线成像系统。还有一些非主流成像技术在发展应用中，如砷化镓半导体型探测器、线扫描探测器等。X 射线成像系统 DR 系统的应用使得 X 射线成像在图像质量、放射剂量、数据处理、工作效率上都获得了巨大的提高，增大了拍摄的 X 光片信息，在医疗诊断的应用中，成像综合水平远远超过了普通 X 光片，为医疗诊断提供了更丰富的图片信息，数字化的成像技术也更方便图像的存储、传输、浏览。直接数字 X 射线成像系统技术及设备的日益成熟，使 DR 广泛应用于医疗诊断、工业检测、科学研究等领域。

参考文献

[1] Martin Hoheisel. Review of medical imaging with emphasis on X-ray detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A,2006,563:215-224
 [2] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008
 [3] Kazuki Ito, Yurii Gaponov, et al. A 3×6 arrayed CCD X-ray detector for

continuous rotation method in macromolecular crystallography[J]. Synchrotron Radiation, 2007,14:144-150
 [4] Anastasios C. Konstantinidis, Magdalena B. Szafraniec, et al. The Dexela 2923 CMOS X-ray Detector: A flat panel detector based on CMOS active pixel sensors for medical imaging applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A,2012,689:12-21
 [5] 李继军, 杜云刚, 张丽华等. CMOS 图像传感器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2009,(4):45-52
 [6] 朱耆祥. CCD 成像探测器 [J]. 现代物理知识, 2009, 21(6):8-11
 [7] James Janesick, Tom Elliott, James Andrews, et al. Fundamental performance differences of CMOS and CCD imagers: Part V[A]. Proc. of SPIE[C], 2013,8659,865902.
 [8] P. Sharma, S.N. Swetadri Vasani, A Jain, et al. EMCCD-based high resolution dynamic X-Ray detector for neurovascular interventions[A]. 3rd Annual International Conference of the IEEE EMBS[C], 2011:7787-7790
 [9] C.J. Bebek, R.A. Coles, P. Denes, et al. CCD Research and Development at Lawrence Berkeley National Laboratory[A]. Proc. of SPIE[C], 2012,8453,845305.
 [10] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, J. Salvi. Review of CMOS image sensors[J]. Microelectronics Journal,2006,37:433-451
 [11] A C Thompson, E M Westbrook, W M Lavender, J C Nix. A large area CMOS detector for shutterless collection of x-ray diffraction data[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014,493,012019
 [12] Floyd CE Jr, Warp RJ, Dobbins JT, et al. Imaging characteristics of an amorphous silicon flat-panel detector for digital chest radiography[J]. Radiology, 2001, 218:683-688
 [13] Fu Jian, Li Bin, Jiang Baihong. X-ray integrated digital imaging system based on a-si flat panel detector[A]. Proc. of SPIE[C], 2010,76585
 [14] Yoshihiro Okada, Keiichiro Sato, Takaaki Ito, et al. A newly developed a-Se mammography flat panel detector with high-sensitivity and low image artifact[A]. Proc. of SPIE[C], 2013,8668(3):303-311
 [15] George Zentai. Comparison of CMOS and a-Si Flat Panel Imagers for X-ray Imaging[A]. IEEE International Conference on Imaging Systems & Techniques[C], 2011: 194-200
 [16] 李金霞, 杨旭, 赵宏波. DR 不同类型平板探测器性能的比较研究 [J]. 中国医学装备, 2011, 8 (8) : 25-27
 [17] 段勇. 非晶硅和非晶硒平板探测器在胸部影像中的表现 [J]. 中国医疗设备, 2008, 23 (3) : 106-7
 [18] 朱晓明. CR 与 DR 性能影像特点及临床应用的比较研究 [J]. 中国卫生产业, 2013 (26) : 168-9

[19]GE Healthcare. Definium 6000 数字化医用 X 射线摄影系统 [EB/OL]. http://www3.gehealthcare.cn/zh-CN/Products/Categories/Radiography/Definium_6000

[20] 科讯医疗. GE 在中国首推科技领先 X 光机 Discovery XR650 面世, 再创诊断 X 光技术新巅峰 [EB/OL]. http://md.tech-ex.com/2010/imaging/imag_mainland/6263.html

Development progresses of X-ray detectors

MIAO Qing¹, WANG Gao², Li Yang-jun²

(1. *Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China*; 2. *National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

Abstract: With the developments of X-ray-related technologies, the performances and the overall level of X-ray imaging detector have made great progresses. In this paper, early X-ray detectors are introduced. Direct digital radiography, the main application of X-ray imaging

detector, is made a detailed introduction. The development situations are reviewed at home and abroad, and the future of X-ray detector is prospected.

Keywords: X-ray screen film; computed radiography; flat panel detector; direct digital radiography

作者简介

苗青, 中北大学信息与通信工程学院研究生, 研究方向: 光谱成像、图像处理。

通信地址: 山西省太原市尖草坪区学院路 3 号中北大学
邮编: 030051

邮箱: 749976874@qq.com

王高, 中北大学电子测试技术国家重点实验室、中北仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 教授, 研究方向: 弹丸和破片速度测试、瞬态高温测试、太赫兹光谱等。

李仰军, 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 教授, 研究方向: 光电精密仪器、光电探测理论与技术研究。