

X射线探测器的研究现状与展望

侯玉欣^{1,2} 陈明^{1,2,†} 杨春雷^{1,2,††}

(1 中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518005)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

2021-06-29收到

† email: ming.chen2@siat.ac.cn

†† email: cl.yang@siat.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210804

Present status and prospects of X-ray detectors

HOU Yu-Xin^{1,2} CHEN Ming^{1,2,†} YANG Chun-Lei^{1,2,††}

(1 Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 X射线影像设备广泛应用于医疗健康、工业无损探测等领域。当X射线穿过不同密度和厚度的人体组织或者工件时，X射线被吸收的程度不同，人们通过X射线强度的变化及分布情况可以诊断一些肉眼不可见的疾病或者检测工件内部各种宏观或微观缺陷的性质、大小及分布。近年来，如何设计空间分辨率更高、X射线使用剂量更低、成本更低的X射线影像设备是各大X射线影像设备公司以及本领域科研人员的研究目标。文章主要从X射线探测器的结构和材料角度出发，回顾了X射线探测器的发展，讨论了不同探测材料对于X射线的吸收以及探测性能，最后展望了X射线探测器的未来发展方向。

关键词 X射线，间接型/直接型X射线探测器，探测材料

Abstract X-ray imaging has wide application in the areas of health-care, non-destructive detection, and so forth. When X-rays penetrate through human tissues or workpieces of different density and thickness, varying degrees of the radiation are absorbed. We can detect and diagnose diseases which are not visible to the naked eye, or detect the properties, size and distribution of various macroscopic or microscopic defects inside objects through the variation and distribution of the X-ray intensity. In recent years, the design of X-ray imaging equipment with higher resolution, lower dosage and lower cost has been the goal of manufacturing companies and scientists in this field. This paper reviews the development of X-ray detectors from the perspective of their structure and materials, and discusses the absorption and performance characteristics of different detection materials. Finally, we survey the future development of X-ray detectors.

Keywords X-ray, indirect/direct X-ray detector, detect material

1 引言

1895年，一份研究通讯《一种新射线——初步报告》引起了全世界物理学家们的极大关注。这种射线由于它特殊的性质以及神秘的身份被取

名X射线。短短几个月，X射线就被应用于各种实验，尤其医学诊断发展极为迅速。125年后的今天，科学家们早已揭示了X射线的“真实身份”——X射线是一种波长极短(0.001—10 nm)、能量很强的电磁波。X射线的穿透能力强，不同密度的物体对X射线能量的吸收不同，因此可以

用于检测一些材料内部的结构信息。X射线作为一种不可见光，需要探测手段对其进行表征，才能更好地服务于科学。X射线探测表征经历了从最早的摄影干板、胶片/增感屏组合，到目前数字化X射线图像的发展历程。其中X射线探测器是X射线成像系统中极其重要的一环，对成像的好坏起决定性作用。

伦琴用X射线为妻子拍摄手部骨骼照片后，X射线在医疗检测及工业无损检测中迅速普及。X射线的发现开创了现代医疗影像技术的先河，20世纪70年代中期，电子计算机的应用为医疗影像带来了第一次革命性的创新，结合了电子计算机的X射线断层成像(CT)技术，可以更好地分辨人体内部结构，大幅提高了疾病诊断的准确性，成为20世纪医学诊断领域所取得的最重大突破之一。此后，医疗影像技术迅猛发展，计算机放射成像(CR)、数字放射成像(DR)、发射式计算机断层成像(ECT)等各种数字化医疗影像新技术不断涌现，组成了功能强大的放射成像信息系统(RIS)^[1]，成为医疗诊断必不可少的重要基石。

X射线应用于医学诊断，主要依据X射线的穿透作用、差别吸收、感光作用和荧光作用。由于人体不同组织对X射线的吸收量有差异，如骨骼吸收的X射线量比肌肉吸收的量，因此透过人体的X射线便携带了各部分人体组织的信息，在荧光屏上或摄影胶片上引起的荧光作用或感光作用的强弱就有较大差别，并最终显示出不同密度的阴影。根据阴影浓淡的对比，医生对一些人体内脏器官的疾病进行诊断。X射线应用于工业无损探测，主要原理是穿透被测物的X射线具有

反映被测物内部结构的信息，人们通过X射线强度的变化及分布来检测与评判材料或工件内部各种宏观或微观缺陷的性质、大小及分布情况，进而判定被检对象所处技术状态，比如是否合格、剩余寿命等(图1)。

无论是医疗诊断还是工业无损探测，图像质量与X射线探测器的性能密切相关。探测器的关键参数包括空间分辨率、响应均匀性、对比灵敏度、动态范围、采集速度和帧率等^[2-4]。除了利用以上提到的数字化技术以及现如今与人工智能(AI)结合来优化探测图像的细节以外，从根本上，即从探测材料本身的角度出发来提高探测器的性能更加重要，包括基于X射线转换的各种方法——间接地利用光子作为中间体传输信号以及直接的X射线到电荷转换。

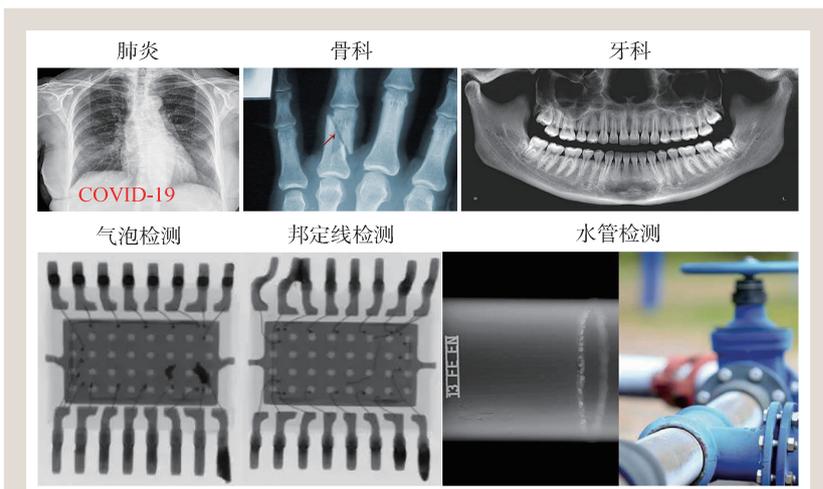


图1 X射线成像技术广泛应用于医学诊断及工业无损探测等领域

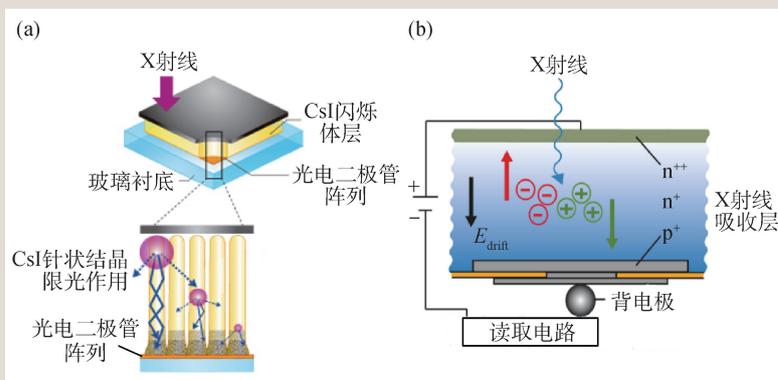


图2 (a)间接型X射线探测器原理图，X射线先转化为荧光信号，之后转化为电信号；(b)直接型X射线探测器原理图，X射线直接转化为电信号

2 X射线探测器的分类

根据光电转化过程的不同, X射线探测器可以分为间接型和直接型探测器, 如图2所示。间接型X射线探测器通过闪烁体材料吸收X射线并转化为荧光信号, 之后通过光电二极管将荧光信号转化为电信号(图2(a))。直接型X射线探测器中, 光电转换层直接将X射线转化为电信号(图2

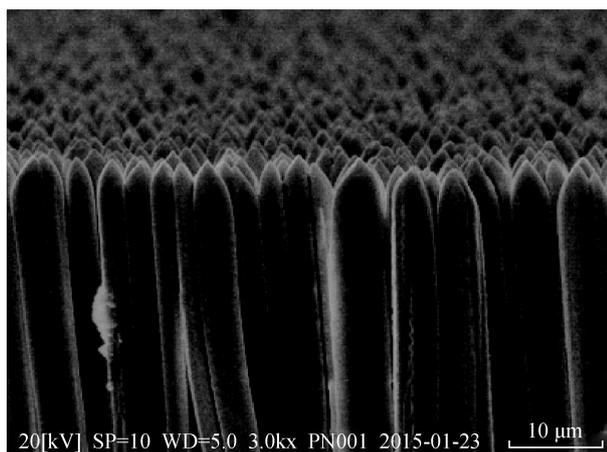


图3 针状碘化铯闪烁体的扫描电镜图像: 针状晶体具有限光作用, 能够有效降低光的散射, 进一步提高空间分辨率^[9]

(b))。根据电子信号的采集过程不同, X射线探测器又可以分为薄膜晶体管(TFT)平板型探测器、互补金属氧化物半导体(CMOS)平板型探测器以及数据采集卡型探测器点阵。

2.1 间接型X射线探测器

间接型X射线探测器由闪烁体或荧光体、光学镜头以及接收电信号的装置组成^[5]。X射线闪烁体的理想性能是: (1)高光输出; (2)低余辉; (3)低辐射损伤; (4)高均匀性; (5)高可加工性; (6)高化学稳定性^[6-8]。由于间接型X射线探测器比直接型X射线探测器造价便宜、性能稳定且响应速度快, 适用于动态扫描检测诊断, 已广泛应用于普通平板X射线探测器中。

掺杂铊的碘化铯(CsI: Tl)和掺杂铽的硫氧化钆($Gd_2O_3S: Tb$, GOS)被广泛用作间接型X射线探测器的闪烁体, 其中CsI的X射线吸收系数大, 且量子探测效率高达 $64000 MeV^{-1}$, 成像速度快, 并且其针状结晶的晶界面可以有效抑制荧光信号漫反射(图3), 被东芝、岛津等厂家广泛使用, 渐渐成为高分辨需求下X射线探测市场的主流, 国际领先的产品

可以实现 $0.30 mR$ 的低辐射剂量下成像和 $140 \mu m$ 以下的空间分辨率。此外, 由于其纳米微粒子可以嵌入在柔性基体中, 因此具有成本相对便宜且能够做成柔性器件的优势^[9, 10]。为了进一步提升探测效率, 人们需要大幅增加闪烁体材料的吸收层厚度, 但是由于荧光信号的散射, 继续增加厚度得到的荧光信号增强效应十分有限, 而且会急剧牺牲成像的空间分辨率。此外, 由于闪烁体的余辉特性, 响应时间相对较慢, 因此需要较长时间的曝光才能获得清晰的X射线图像。

从性能上对比, 碘化铯因为具有针状晶体结构, 将X射线转换成

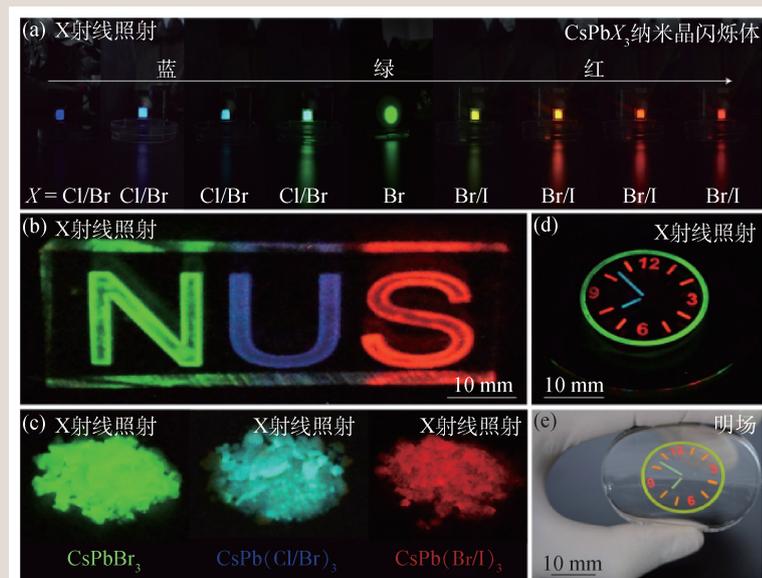


图4 X射线照射下全无机钙钛矿纳米晶的发光性能: 通过调整Cl/Br/I的比例, 实现了X射线激发下钙钛矿量子点蓝绿红三色发光^[13] (a) X射线照射下CsPbX₃(X=Cl, Br, I)量子点的发光照片; (b)多彩X射线闪烁体(CsPb(Cl/Br)₃), CsPbBr₃和CsPb(Br/I)₃发光照片; (c)X射线激发下CsPbBr₃, CsPb(Cl/Br)₃和CsPb(Br/I)₃的发光照片; (d, e)多彩钙钛矿量子点闪烁体在X射线激发下的发光照片及明场照片

可见光的综合转换效率比硫化钨涂层更高，冲激响应的光斑弥散也更小^[9]。因此，采用碘化铯作为闪烁体材料，X射线使用剂量更小，成像更清晰。相比碘化铯，硫化钨涂层的沉积时间短，制造工艺相对简单，成本低廉，仍然可应用于许多X射线探测技术上。

钙钛矿纳米晶体(PNCs)作为新型闪烁体，由于具有非常高的紫外(UV)量子产率(>95%)及X射线辐照下的光响应^[11, 12]，可以制成高性能且生产成本低廉的X射线探测器。X射线可以直接作用于CsPbX₃(X=Br, Cl, I)量子点，通过量子约束以及电子和空穴波函数的交叠效应使X射线激发下形成的激子束缚在纳米晶的玻尔半径内，从而诱发辐射发光(RL)。基于此，黄维院士团队发现了一种铯原子和铅原子组成的全无机钙钛矿纳米晶体^[13]。如图4所示，这些固态纳米晶闪烁体表现出强烈的X射线吸收和辐射发光效应。此外，制备的钙钛矿纳米晶闪烁体的发光波长动态可调，可以为X射线成像提供一个方便的可视化工具，相关的图像可以直接由标准的数码相机记录。这种技术目前还处于探索阶段，暂时未能实现产业化。主要原因是PNCs在X射线辐照下稳定性比较差，一方面是因为PNCs材料对光、热等环境比较敏感，另一方面是因为PNCs容易团聚且发生相变。

除了追求更高的空间分辨率，人们在X射线能量分辨上也提出了高需求。传统的X射线成像设备只使用一个能谱分布的X射线源对物体成像，获得的结果仅为衰减系数图像，只能呈现被检测物体基本的检测和定位信息，有时候会导致两种不同材料的成像完全相同。针对这个问题，人们研发了双能或多能X射线探测器。基于间接型X射线探测器，第一种办法是将两个或多个平板探测器进行叠层而形成单次曝光双能或多能探测器(图5)。在图5这种结构中，两组探测器之间的滤波片将X射线进行整形，之后将低能量和高能量X射线分别进行探测，单次曝光条件下，可以同时获得高低能的投影数据。这种技术成本较低，实现方式较为简单，不过缺点也很明显，主要是因为高低能量射线的能谱区分度不大，此外受X射线光束硬化等效应的影响严重，因此常常

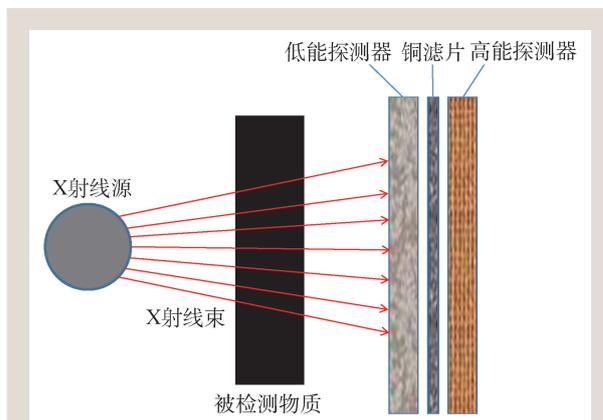


图5 伪双能X射线透射系统：单次曝光条件下，同时获得高低能的投影数据，但由于高低能量X射线的区分度不大，常被称为“伪双能”^[14]

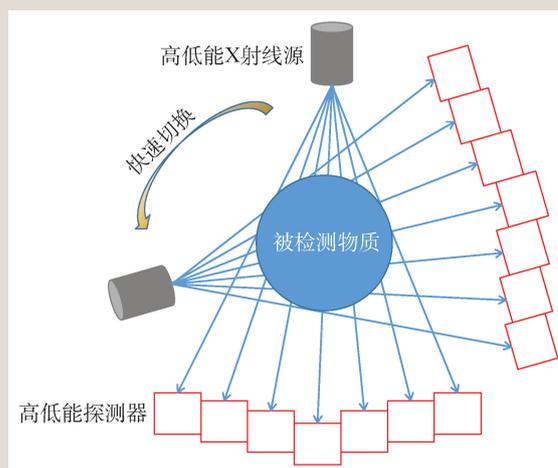


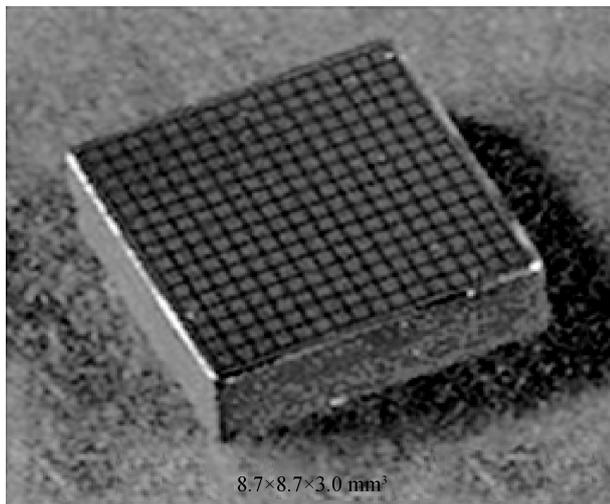
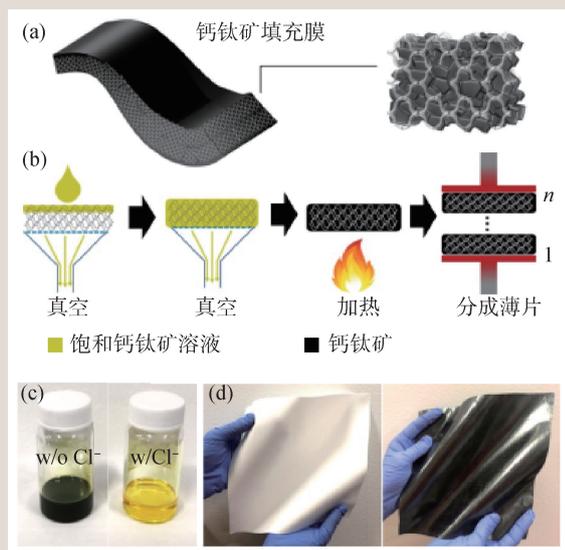
图6 双能计算机断层扫描(CT)系统示意图：通过高低能X射线源的快速切换获得不同能量射线响应的图像^[14]

被称为“伪双能”成像^[14]。

另外一种方法是采用两种或多种不同能量的X射线对物体进行扫描，以双能X射线探测器为例，采用高低能量的X射线照射可以得到物体在不同能量射线响应下的图像(图6)。根据X射线与物质的作用规律，作用后的衰减与物质的原子序数 Z 和射线能量 E 均有关系，根据衰减后的数据可以确定被扫描物质的原子序数，从而进行物质识别或者鉴定。

2.2 直接型X射线探测器

相较于间接型X射线探测器，直接型X射线探测器具有更好的空间分辨率。它们不需要通过

图7 CZT直接型X射线探测器^[20]图8 应用于直接型X射线探测器的柔性大面积钙铋矿填充膜(PFM)的制备 (a)PFMs膜孔洞结构；(b)钙铋矿填充膜(PFM)制备工艺；(c)钙铋矿前驱体溶液不含MACl(左)和含MACl(右)的照片；(d)钙铋矿加载前(左)和加载后(右)大面积(400 cm²)柔性PFMs膜^[23]

闪烁体或荧光材料将X射线转换成可见光，而是在X射线辐照到直接探测材料时产生电子—空穴对，这些电子和空穴在外加偏压电场作用下形成电流，然后电流在TFT平板或其他读出系统上积分形成储存电荷。通过设备读出电荷量，就可以知道每个点的X射线剂量。

非晶硒、碲化镉(CdTe)、碲锌镉(CdZnTe, CZT)以及硒化镉(CdSe)等都属于直接探测材料，它们具有较高的原子序数、较大的X射线吸收系

数和较高的载流子迁移率，被期望能够广泛地应用在X射线探测技术上^[15, 16]。这些材料的厚度往往只需要毫米级，就可以完全吸收千伏级的X射线，而且没有任何的延迟或重影。它们的沉积过程也不需要后续的光刻要求，对水分不敏感，并且毒性较小，对环境友好(相较于大多数掺杂重金属的碘化铯或硫化钨闪烁体而言)。

将非晶硒涂敷在TFT阵列平板上，可以避免X射线转换成可见光过程中产生的散射和损失，同时可以降低X射线剂量辐射从而减小对人体带来的危害，减少图像清晰度损失，具有较高的空间分辨率。但是一方面由于硒元素对X射线的吸收性能差，器件量子探测效率和灵敏度低，受热结晶会导致性能衰减；另一方面，这种探测器启动的偏压电场高达数千伏，而高压电场会对TFT开关造成不可逆的损伤，使得非晶硒探测器的使用寿命不长，并且非晶硒直接型探测器维护成本也相对较高。

自20世纪70年代初以来，CdTe和CZT被认为是一种很有前途的用于硬X射线吸收的半导体材料。CZT/CdTe探测器的厚度一般为2—3 mm，能够有效地吸收1—140 keV范围内的X射线^[17]，即使在室温下也能提供良好的能量分辨率^[18—20](图7)。近年来，人们提出了一种具有像素化电极结构的CdTe/CZT探测器，用于高通量能量分辨X射线成像的光子计数(ERPC)系统，在诊断医学、工业成像等领域非常有吸引力^[21]。然而CdTe/CZT探测器在大面积和快速成像上不具备优势，尽管可以通过拼接法应用于CT成像，却无法用于数字放射成像的平板探测成像。

目前研究较多的钙铋矿块状晶体材料可以将捕获的光子直接转换成载流子，为X射线探测提供了良好的契机。钙铋矿具有优异的载流子输运特性和重原子(铅，溴)组成架构，这种出色的电荷输运特性和结构特性是实现直接X射线转换的理想选择，近十年来受到广泛关注。当钙铋矿材料接受X射线的照射时，钙铋矿会吸收光子产生电子—空穴对。这些钙铋矿材料往往具有较低的载流子复合几率和较高的载流子迁移率，载流子

的扩散距离和寿命较长,是一种很有发展前景的X射线探测材料。2017年,美国的内布拉斯加州里大学的黄劲松课题组,通过引入氯元素来降低MAPbBr₃(甲氨基溴化铅)钙钛矿单晶中的缺陷,实现了和CZT晶体可比拟的X射线探测器,对于8 keV软X射线的灵敏度高达84 μC·mGy_{air}⁻¹·cm⁻²。此外,钙钛矿材料还可以在低温、无真空条件下制备,并可以通过跟柔性基底结合,制备大面积柔性探测结构^[22]。2020年,黄劲松教授团队利用MAPbI₃制备了高灵敏度、柔性和大面积X射线探测器的钙钛矿填充膜(PFM)结构(图8)^[23]。其中,面积达400 cm²的PFMs是通过渗透饱和钙钛矿溶液通过多孔聚合物膜,然后热层压形成的。柔性PFMs可以在2 mm弯曲半径时不损失性能。然而,直接型钙钛矿探测器的检测极限仍低于基于闪烁体的X射线探测器(13 nGy_{air}·s⁻¹),主要原因是暗电流和离子迁移诱导的基线漂移增加了散粒噪声水平。

此外,实现硅和钙钛矿的单片集成结构是将高性能钙钛矿X射线探测器推向大规模产业化的核心要点。然而,简单地将整块钙钛矿与硅或硅基薄膜晶体管等结合会造成相邻像素间电信号的串扰,从而造成较低的空间分辨率。将钙钛矿图案化可以解决电信号的串扰问题,常见的图案化手段包括自下而上的光刻技术和激光划线等技术。但是,光刻工艺中钙钛矿材料与有机溶剂接触后性能容易恶化,而激光划线工艺会造成钙钛矿材料的损伤和非晶化。最重要的是,受限于工艺本身限制,以上制备手段获得的钙钛矿薄膜的厚度通常都是亚微米级别,厚度太薄而远远不足以吸收大部分X射线能量,从而造成较低的探测灵敏度。作者研究团队采用深硅刻蚀和钙钛矿原位生长技术,成功实现了硅基集成、厚度达300 μm的图案化钙钛矿^[24]。一方面,相比传统平面结构,同轴硅钙钛矿的异质结构

拥有更大的界面面积和更长的光生载流子寿命(更短的载流子输运时间),因而有效增强了X射线探测器的探测率。另一方面,足够厚度(约300 μm)的钙钛矿保证了X射线能量的充分吸收。得益于此,团队获得了高灵敏度(高于商业化直接型X射线探测器α-Se 1个量级)、快速响应(毫秒级别响应时间)、高分辨率(约0.5 mm)的硅基集成、像素化的直接型钙钛矿X射线平板探测器(图9)。

基于直接型材料的能量分辨X射线探测器主要采用了光子计数技术。光子计数X射线探测器

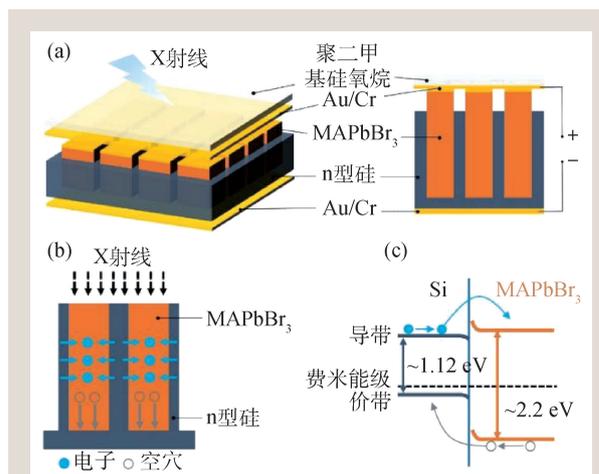


图9 (a)硅基集成、图案化的钙钛矿直接型X射线平板探测器;(b)X射线辐照下载流子迁移示意图;(c)硅—钙钛矿异质结能带图

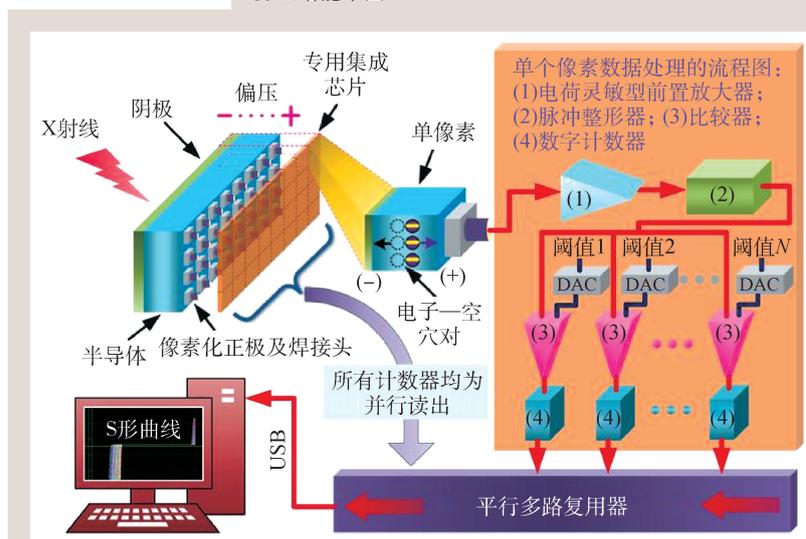
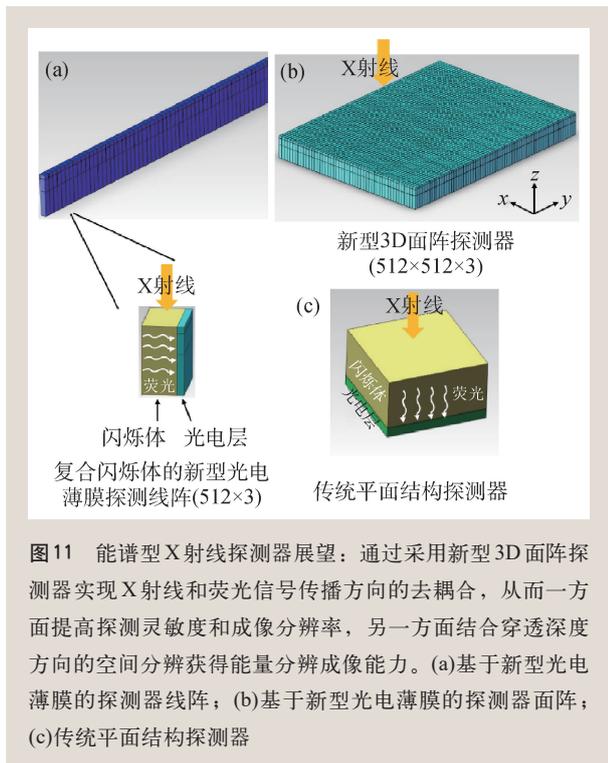


图10 光子计数X射线探测器及其高速处理电子设备^[26]:入射的X射线将能量沉积在探测器中,并转化为电信号输出,经过电子学设备的处理和传输进入计算机系统(其中DAC为数字模拟转换器)



可以将每个入射的光子作为一个独立的事件分析，能够将非常宽能谱的X射线分能区进行计数，并判断其所属的能量区间，因而具有能谱分辨能力，实现了多能谱成像^[25](图10)，该技术被认为是未来X射线成像领域的发展方向。当前使用最为广泛的材料为CdTe及CZT晶体。然而，光子计数X射线探测器仍然受以下两点制约。首先是在计数率较高时不同光子与物质相互作用会产生叠加，会极大地降低空间分辨率，而CT成像对探测器的分辨率具有较高的需求，这些都限制了光子计数探测器的应用。未来的发展方向在于进一步提高电子学的处理速度。

3 总结与展望

无论是在医疗健康领域还是在工业无损检测领域，X射线影像设备都具有不可替代的重要作用。特别是随着全球疫情的爆发，各种防护服、护目镜、呼吸机、输注泵和医学影像等医疗器械成了重要的战略物资，也使得医疗器械行业得到了前所未有的发展。在目前的医学检测手段中，医学影像数据占据了90%的医疗信息，是疾病筛

查和诊治最主要的信息来源，也是辅助临床疾病诊疗的重要手段。经过几十年的发展，医用X射线探测技术在成像效果和减少辐射剂量方面都取得了很大进步。

放眼国际和未来，X射线探测器的研发仍然需要更加的人性化、友好化。其中，X射线医疗检测中病人以及医护人员的被辐射剂量问题越来越受到关注，急需具有更高探测灵敏度的设备实现超低剂量成像，此外复杂人体组织成像对于成像分辨率有很高的要求。目前的X射线探测器在X射线探测材料、器件结构设计以及成像处理方面都有不足，因此X射线探测器在性能和成本上均有很大的改善空间，采用新型探测结构或新型材料是解决问题的关键。比如，对于间接型X射线探测器，可以通过在CMOS芯片上集成三维闪烁体纤维阵列，在纤维的外壁包裹一层金属层，利用厚度可调的纤维板大幅提高吸收层厚度从而实现低剂量探测；通过纤维的全反射特性和金属包层的X射线屏蔽效果，克服像素间信号的串扰，从而在实现低剂量的同时实现高分辨率成像。再比如，对于能谱型X射线探测器，可以利用新型高量子效率薄膜光电材料铜铟镓硒(钙钛矿)，通过对间接型X射线探测器的闪烁体和光电转换层进行3D结构创新设计(图11)，从而在不牺牲分辨率的情况下大幅提高吸收层厚度从而实现高灵敏度探测，结合穿透深度方向的空间分辨探测技术获得能量分辨成像能力。

未来随着探测器新材料、新结构的不断开拓优化以及外部配套电子学设备的发展，空间分辨率更高、剂量更低等具有高综合性能的X射线影像设备未来可期!

参考文献

- [1] Cowen A R, Kengyelics S M, Davies A G. Clin. Radiol., 2008, 63 (5): 487
- [2] Korner M, Weber C H, Wirth S *et al.* Radiographics, 2007, 27 (3): 675
- [3] Milbrath B D, Peurrung A J, Bliss M *et al.* Journal of Materials Research, 2011, 23(10): 2561

- [4] Yaffe M J, Rowlands J A. *Physics in Medicine and Biology*, 1997, 42(1): 1
- [5] Heo J H, Shin D H, Park J K *et al.* *Adv. Mater.*, 2018, e1801743
- [6] Dobbins Iii J T, Polischuk B T, Boone J M *et al.* Selenium direct-converter structure for static and dynamic X-ray detection in medical imaging applications. In: *Medical Imaging 1998: Physics of Medical Imaging*, 1998
- [7] Hormozan Y, Sychugov I, Linnros J. *Med. Phys.*, 2016, 43 (2): 696
- [8] Mukherjee A, Vasileksa D, Akis J *et al.* *ACS Omega*, 2021, 6 (7):4574
- [9] Kim M S, Lim K T, Kim G *et al.* *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 882: 84
- [10] Kim K T, Kim J H, Heo Y J *et al.* *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2018, 18 (9):5976
- [11] Li Z, Kong L, Huang S *et al.* *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2017, 56(28):8134
- [12] Yang L, Zhang H, Zhou M *et al.* *J. Phys. Chem. Lett.*, 2020, 11 (21):9203
- [13] Chen Q, Wu J, Ou X *et al.* *Nature*, 2018, 561(7721):88
- [14] 项里伟. *科技广场*, 2016, 9:87
- [15] Wei S, Yang M, Sun H *et al.* *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(50):56126
- [16] Prokesch M, Soldner S A, Sundaram A G. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(4):044503
- [17] Turturici A A, Abbene L, Gerardi G *et al.* *Detectors and Associated Equipment*, 2016, 830:243
- [18] Bell S J, Baker M A, Duarte D D *et al.* *Journal of Instrumentation*, 2017, 12(6):P06015
- [19] Tie S, Zhao W, Huang W *et al.* *J. Phys. Chem. Lett.*, 2020, 11 (19):7939
- [20] Szeles C, Soldner S A, Vydin S *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55(1):572
- [21] Kasap S, Frey J B, Belev G *et al.* *Sensors(Basel)*, 2011, 11(5): 5112
- [22] Wei H, DeSantis D, Wei L. *Nature Materials*, 2017, 16(8):826
- [23] Zhao J, Zhao L, Deng Y *et al.* *Nature Photonics*, 2020, 14(10): 612
- [24] Tian S, Sui F, He K *et al.* *Nano Energy*, 2020, 78: 105335
- [25] 郝佳, 张丽, 陈志强 等. *CT理论与应用研究*, 2011, 20(1): 141
- [26] Ren L, Zheng B, Liu H. *Journal of X-ray Science and Technology*, 2018, 26(1):1



CIOE
中国光博会

光学全产业链
展示及交流平台

精密光学展
镜头及摄像模组展
PRECISION OPTICS, LENS & CAMERA MODULE EXPO

2021年9月1-3日
深圳国际会展中心 (宝安)

扫码登记免费参观

同期展会

- 信息通信展
INFORMATION COMMUNICATIONS EXPO
- 激光技术及智能制造展
LASER TECHNOLOGY & INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO
- 红外技术及应用展
INFRARED APPLICATIONS EXPO
- 智能传感展
INTELLIGENT SENSING EXPO
- 光电子创新展
PHOTONICS INNOVATION EXPO

第23届中国国际光电博览会

160,000M² 展出面积 | 95,000+ 专业观众 | 3,000+ 参展企业

PRX family是美国物理协会 (APS) 出版的以开放获取为发表模式的期刊新系列，以其高甄选性尤其是强调文章的持久影响力闻名。

创刊十年享誉
中外

PHYSICAL REVIEW X

涵盖所有物理学相关领域研究

期刊影响因子
15.762*

*2020 Journal Citation Reports
(Clarivate, 2021).

至今已发100多
篇文章

PRX QUANTUM[®]

涵盖量子信息科学和技术

2021
年的新成员

PRX ENERGY[®]

涵盖能源研究和相关技术

创刊一年蒸蒸日上。今年年底之前投稿

APS将免收全部稿件处理费用 (APC)

今夏开始接受投稿。2022年底之前投稿

APS将免收全部稿件处理费用 (APC)



PUBLISHED BY THE
AMERICAN PHYSICAL SOCIETY

诚挚地向您征稿，邀您同行
journals.aps.org