X 射线影像探测器

1895 年，伦琴(Wilhelm Röntgen)使用真空管产生 X 射线，并将产生的 X 射线记录在感光照相胶片上. 他夫人手掌的 X 射线影像成为了一个著名的范例. 现在，真空管已经被搁置在博物馆中，而感光胶片还被我们经常使用. 随着新型同步辐射光源、X 射线光学，以及计算方法的快速进步，探测器技术的进展为探测物质的结构与动力学过程开辟了新的途径.

考古学家在摩洛哥发现，一个 16 万年以前生活在北非的孩子保存有良好的下颌骨. 令人惊讶的是，使用 X 射线层析重构技术，我们可以知道这个孩子生活了 2839 天. 人类的牙齿珐琅质每天都有微小的增加，从图 1 可以清楚地看到这些微米尺度的变化. 这种 X 射线显微层析成像是最精确的的技术之一，它为我们提供了分析人类化石演变过程的检测方法.

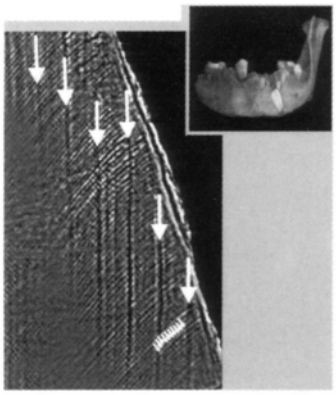


图 1　X 射线层析成像重构法提供材料电子密度分布的三维图像. 它显示一颗牙齿上硬珐琅质的密度变化. 这颗牙齿取自一个古代北非儿童的下颌骨化石(见右上角插图). 图中垂直箭头显示牙齿周期生长线，称为 Retzius 线. 与 Retzius 线相交的短对角线显示每日的增长，间距 5μm. 这些数据提供了这个儿童年龄的准确信息

化石的 X 射线层析重构技术仅是许多事例之一，X 射线方法可以用于无损检测材料的结构或者化学组成的细节. 比如揭示著名大师的油画底层隐藏的颜料，解密曾经用含铁的墨水书写在阿基米德手稿上已经褪色的数学证明，用测量鱼类头部累积的金属含量来跟踪鱼类的回游习惯，通过分析树木结构来确定著名的火山喷发时间等. 现代 X 射线方法还可以用于研究变化过程中完全不同的现象，比如实时检测昆虫的吞咽和呼吸、纳米线中的电子迁移过程、快速相变过程、微射流中的湍流，以及气体中的冲击波等.

在上面所有事例中，X 射线探测器是进行成功探测的关键器件. 理想的探测器应当具有高空间分辨、高时间分辨和能量分辨能力. 但是在现实中，人们在优化某些性能的分辨率时，常常必须牺牲其他性能的分辨率. 近年来，尽管 X 射线探测器已经取得了很大的改进，但是这个进展仍然跟不上 X 射线光源和 X 射线光学的进步.

在本文中，作者概述了 X 射线探测器的发展过程，强调在测量过程中对于高分辨率的需求，并主要介绍了用于同步辐射光源硬 X 射线的成像探测器.

传统的医学成像

在历史上，医学应用推动了 X 射线成像的发展. 伦琴发现了 X 射线后，用照相底片记录了 X 射线影像. 目前，底片和荧光板是应用最普遍的 X 射线探测器.

X 射线底片仍然在医学影像中占主导地位. 底片的价格低，便于使用，并且能提供大尺寸影像. 感光胶很薄，因此能够提供微小物体成像. 更为重要的是，存储 X 射线影像的底片便于携带，可以长久保存. 仅仅在过去 20 年来，海量数字存储才表现出容量大、价格低的优势，并且向传统存储介质的胶片提出挑战.

存储荧光板，也称为影像底板，是上世纪 80 年代首先在日本产业化的产品. 在典型的发光材料中，电子被离子化辐照所激发，形成单线态或者三线态后，通过退激发跃迁以可见光子形式发射. Er 掺杂的溴氟化钡具有光激发的发光性质：电子在材料中被捕获，成为亚稳－带间态，寿命可达数日. 因此，这个材料可以用处于捕获态的电子分布来储存影像. 当用可见光对影像板再次曝光时，将使得捕获态激发，导致电子和空穴的再次结合，发出可见光.

存储荧光板是很有效的，原因是每个照射的 X 射线光子产生多个光学光子. 这种影像板可以多次使用，用可见光照射就可以清空所捕获的载流子，因而删除信息. 调整荧光层的厚度，可以调节捕获 X 射线的能力和空间分辨率，荧光层的典型厚度为 50 μm. 在几个数量级范围内，输出信号正比于入射X 射线的剂量，因此这种探测器具有很宽的线性动态范围. 而其主要的缺点是需要逐行扫描读出数据，一般需要几分钟时间. 这个时间过程在做医学影像时尚可接受，但是在科学应用中速度不够快，因此应用范围有限.

可以将 X 射线探测器看作是一种中间转换部件，不仅起到阻止 X 射线在材料中通过的作用，而且产生初始的信号，这些信号可以被放大，或者转换成为电子信号而被探测到. 如图 2 所示，能量转换器可以是发光的荧光层，其信号通过图像增强器后被一个 CCD(电荷耦合器件)记录. 这个过程是间接探测的一个例子：被收集 X 射线的介质所产生的信号量子(荧光屏中的可见光子)与最终记录下来的量子不同(在 CCD 中的电荷)，因此被称为间接测量法. 而与此不同的

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权，与 *Physics Today* 合作的项目

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

是，在直接测量方法中，能量转换器与最终成像是同一材料.

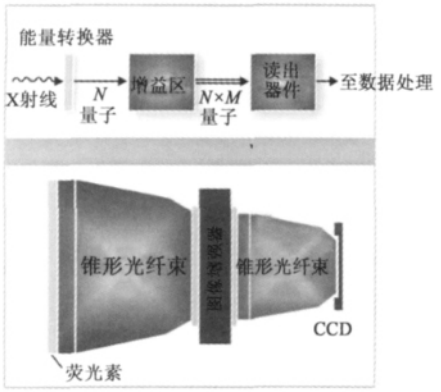


图 2　X 射线影像探测器是记录信号的基本部件　(a) X 射线光子的能量可以被荧光素转换为 N 个可见光光子，这些光子经过图像增强器放大 M 倍，然后由 CCD 读出并且存储；(b)一种特殊的构型. 图像增强器的作用类似于光子倍增管：可见光子打击光阴极，产生的光电子在通过增强器中狭窄缝隙时被加速，然后射入另一个荧光层，以产生更多的可见光光子. 经过放大的影像从增强器射出，然后被另外一个锥形光纤束所捕获，后又转移到 CCD

间接法的 X 射线探测技术复杂，并且会带来非线性及图像失真. 在同步辐射光源上的科学影像装置中，最普通的探测器构型(图 2(b))如下：一个薄荧光屏放置在锥形光纤束(fiber-optic taper)一端，用来将发射出的光纤引导到 CCD 上. 使用锥形光纤束的作用是将影像缩小到 CCD 上，同时锥形光纤器件的透光率比镜头更高.

较好的处理方案－直接法探测器

最近几年发展的直接法探测器具有很大优势. 考虑 10 keV X 射线在单晶硅中的转换问题. 在 1ns 以内，X 射线能量被转换为 1μm 大小空间中的电子－空穴对，X 射线能量中每 3.64 eV 产生一个电子－空穴对. 从统计学上讲，这个过程效率非常高，即 10keV X 射线产生 2740±20 个电子－空穴对. 如果 X 射线被阻断在反向偏压二极管的结区，电子－空穴对会按照电力线排列，而很快被二极管电极所收集，这样就限制了载流子的空间发散而提高空间分辨率.

因此，与间接法探测器相比，直接法的优势是，不但简化了在二极管中的能量转换和信号采集，而且速度更快(在纳秒范围)，空间分辨率更高(在微米尺度)，并且由于每个 X 射线光子在硅中产生上千个电子－空穴对，有可能实现单个X 射线光子的探测. 而在间接法中，荧光屏耦合的 CCD 中仅为几十个.

具备实用的 X 射线探测器所需要的性质、质量和尺寸的材料很少. 商用大尺寸科学成像器材料主要是非晶 Se，以及单晶硅. 高原子序数元素构成的光导材料具有很高的 X 射线阻断能力，因此得到商用上的特别需求. 目前进行研发的体系集中在 Ge、GaAs、CdTe 和 CdZnTe.

智能化的像素阵列

最具有广泛应用的新型 X 射线探测器之一是像素阵列探测器(pixel-array detector，PAD)，这是由于高能物理的需求而发展出的技术. 图 3 显示一个 PAD，包括顶端的探测层和下面的集成电路层，由 CMOS 像素电子学构成. 这两层之间通过由 In 或者焊点组成的像素电极结合为一体. 当 X 射线入射到厚度为 500μm 的由高灵敏度硅构成的探测层时，被吸收的 X 射线产生电子和空穴，如果在器件上加上偏压，电子和空穴会沿着电场线分别向两端电极移动. 位于底部的每个电极都与其独有的像素连接，通向下面的集成电路层. 这种类型的复合模块每个尺寸为几个厘米，含有上万个像素. 将这样的模块紧密排列，以构成大的探测器，每个包含几百万个像素. 由于 CMOS 技术的成熟，人们可以在每个像素内放入复杂的、抗辐照的电路，以使其具有可靠的处理性能. 尽管目前单个 X 射线像素尺寸约为每边长 50—200 μm，通过三维设计技术，有可能将这种功能强大的像素点压缩到 20—30 μm.

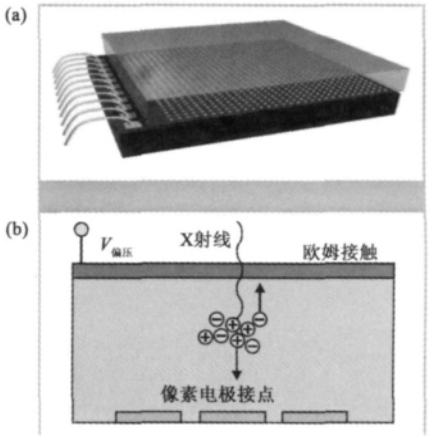


图 3　像素阵列探测器　(a)一层高灵敏度半导体(绿色)与银颗粒排列成的像素相连接，再与一个 CMOS(蓝色)构成集成电路. 在这个芯片中，每个像素都具有独立的电路，向输出引线(金色)输出信号；(b) 显示半导体层的截面，一个被吸收的 X 射线光子产生电子－空穴对. 如果半导体层上部的接点相对于下部像素接点的电压为正极，电子和空穴会被电场垂直分离，电荷的大小与入射 X 射线能量成比例. 空穴被底层电极所收集，通过接点后送往 CMOS 放大器

成像与电子线路

X 射线成像器分为两种类型：光子计数器型和积分器型. 光子计数器型使用脉冲高度整形器来探测单个光子脉冲. 这种电路可以提供适合的能量分辨率，这在 X 射线单色器实验中很有用，但是处理单个 X 射线光子的计数率仅限制在几兆赫兹. 使用积分器可以避免这个问题，即在数字化之前，利用运算放大器将曝光期间采集的入射信号相加. 积分器在瞬时计数率过高时表现其优势. 例如混合模式 PAD (mixed-mode PAD)可以探测 8keV X 射线光子的信噪比达到 8 左右，每个像素的最大剂量可以超过 10^7 个 X 射线光子，帧成像速率可以达到 1kHz.

光子计数探测器则使用不同的方案采集影像数据. 比如，蛋白质晶体照相术是一种最常用和重要的 X 射线成像

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实验之一.在实验中需要将蛋白质晶体在单色 X 射线中旋转.使用 CCD 探测器的常规操作模式是,将晶体在某一时间围绕一个自由度旋转.当一个步骤完成后,关闭 X 射线,然后从探测器中读取数据.而使用 PAD 方法则是从探测器连续获得数据,不关闭快门而在 X 束线中连续旋转晶体.这样可以在几分钟内获得整套晶体数据,数十秒的数据收集时间也是可行的.

最近,在斯坦福线性加速器相干光源上采用"损伤前的衍射(diffract before destroy)"方法.其基本的思路是,将超强的 X 射线脉冲在几十飞秒时间内射入亚微米尺寸的颗粒(如蛋白质纳米晶体,甚至单个蛋白质分子).这个脉冲时间如此之短,产生的衍射发生在光电子反冲之前,这种反冲造成粒子由于正电荷的累积而产生库仑爆发.探测快速到达的 X 射线需要一种积分型 PAD,能够容纳几千个 X 射线光子,并且在具有足够低的噪音条件下运行,以能够在 120Hz 重复速率下敏感地探测单个光子.

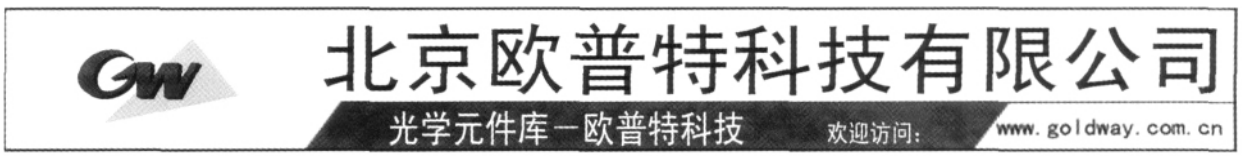
2006 年,欧洲同步辐射装置的科学家们发展了表面掺杂的发光晶体,通过镜头耦合到一个 CCD.高原子量的石榴石单晶被制成厚度为 0.5mm 的薄片,在表面生长一层掺杂百分之几摩尔的 Eu 或者 Tb.人们发现,只有含有掺杂的部分(厚度仅为 10—20μm)发光,石榴石的其他部分只相当于一个衬底.研究人员以此获得亚微米分辨率,但是使用硬 X 射线的效率很低,实验中需要用硬 X 射线穿透厚样品.尽管如此,掺杂单晶薄膜的结果代表当今空间分辨率的最好水平,这种方法已经用于牙齿的断层成像研究.

快速帧面成像器的一个例子是自适增益、积分像素探测器,它是由欧洲 European XFEL 研发的.这台光源将提供 100fs 的 5MHz 脉冲.这个探测器计划的目标是制造具有百万像素成像的仪器,可以用来高速捕获与存取至少 200 幅衍射花样.

新的起点

目前,科学家对于微米尺度(10—1000nm)的非周期结构材料的了解甚少.如果考虑快速过程(亚皮秒范围),人们提出很多问题:材料在周期应力作用下的结构性能如何?为什么催化剂会失效?为什么可充电电池只有有限的充电周期?什么是生物细胞中的动力学过程?养料和污染物如何通过土壤迁移?纳米材料是如何形成的?新型 X 射线影像探测器为我们打开了一个窗口,使得我们能够认识具有关键长度和时间尺度的材料的结构动力学问题.

(北京大学 朱星 编译自 Sol M. Gruner. *Physics Today*, 2012,(12):29,原文详见:http://ptonline.aip.org)



北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校,科研机构,试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询.我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等.



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等.
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜.
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝,镀银,镀金,及介质反射镜.直径 5mm—200mm.
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶.直径 5mm—200mm.
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤,SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头.
- 滤光片:规格为直径 5mm—200mm.(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片.
- 进口光学滤光片:长波通滤光片/短波通滤光片;波长:400—1000nm;窄带干涉滤光片

Intor

地址:北京市朝阳区酒仙桥东路 1 号 M7 栋 5 层东段　电话:010-88096218/88096099　传真:010-88096216

网址:www.goldway.com.cn　E-mail:kevinchen@goldway.com.cn,shinan@goldway.com.cn,zengan@goldway.com.cn

联系人:陈锵先生,施楠小姐,曾安小姐,孙睿小姐

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net