

CCD X-射线探测器和同步辐射

王 德 武

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

一个好的同步辐射 X 射线实验需要具备三条要素:高亮度调频光源;优秀的 X 射线光学设计;有效的探测系统.显然,这三条要求是相互关联,彼此等同重要的.

近十多年来,同步光源有了飞快地发展,第二代、第三代专用同步辐射光源相继诞生.第三代同步辐射光源以贮存环具有小发射度(小于 10nm.rad)和高的光子通量而著称.世界上已经建成或正在建设的第三代同步辐射光源有十多家,其中最具有影响的属美国的 APS(贮存环电子能量为 7GeV),法国的 ESRF(贮存环电子能量为 6GeV)和日本的 Spring-8(贮存环电子能量为 8GeV).这类光源,从贮存环插入件引出的光束线可提供的辉度大约在 10^{16} 至 10^{19} 光子 / sec / 0.1% BW / mrad² / mm². 如此高的光子通量对探测器提出了新的要求,也可以说是一种新的挑战.然而,科学家们却十分渴望高辉度,因为它可以大大地缩短实验时间,开展常规光源无法实现的微区实验、时间依赖的动态研究,研究物质的新性质,探索一些新现象.这里仅对电荷耦合器件(CCD)作些介绍.CCD 作为光子检测器,并用于图象扫描技术,在工业、医学、国防上已经有许多重要的应用.但是,作为 X 射线二维位置灵敏探测器用于同步辐射 X 射线实验,这种探测器技术还相当年轻.近几年,在技术上不断地改进和发展 CCD X 射线探测器,因此,它已成为探测器家族里一个重要成员.

就科学目的而言,仅仅有好的光源,而没有与其相配的探测技术,要想得到好的科学结果,那是不可想象的.因为高辉度是第三代同步光源的最大特点,要用这种光源从事时间依赖 X 射线衍射实验,或是 X 射线散射实验,通常的

探测器是不能胜任的.于是,对探测器提出了新的要求,概括起来有:期望位置灵敏,即给出空间坐标,而且具有好的空间分辨(100 微米);大的动态范围($> 10^3$);高量子探测效率($> 50\%$);好的时间分辨($< 10^{-3}$ 秒).现存的许多探测器系统只具有上述的某些特点,而不是它的全部.但是,CCD X 射线探测系统兼有各种探测器的优点,成为当今探测器研究的一个侧重点.

一、CCD X-射线探测器的工作原理

CCD X-射线探测器属固体探测器的一种,具有高的空间分辨本领,允许测量高光子通量,快速数据处理本领.因此,作为同步辐射研究的新一代探测器,倍受世人关注.CCD X 射线探测器在同步辐射衍射实验中测量布喇格衍射峰的位置和强度,适合测量时间依赖应变,观察相变过程,测量磁性多层膜和高温超导薄膜,Laue 衍射图谱,研究蛋白质的结构等.在小角 X 射线散射实验中观测时间依赖的散射强度,它将为材料科学的研究提供更多的信息.

CCD 工作原理可以概括如下:探测器阵列中的每个单元都是一个金属-氧化物-半导体(MOS)电容器,是在 P 型硅衬底上热氧化生成一层氧化薄膜 SiO_2 ,然后再蒸发镀一层金属层制成的.对 MOS 电容器的金属层进行光刻,制成间距很小的一些栅极,于是一块 CCD 就制造完毕.当在 CCD 的栅极上加正电压时,硅片中的多数载流子(空穴)被排斥形成耗尽层,而在硅的表面层下出现一个位阱,所加电压越高,耗尽层就越深.此时,负电荷落入位阱就被俘获,这样的位阱就可以储存电荷.在 CCD 各个栅极上加上彼此有一定相对相位延迟的三个时钟脉冲,就可以实现电荷转移.相邻三个电

极组成一个存储单元. 很多存储单元排列成一维或二维阵列, 再配备适当的读出电子学线路, 就得到了一维或二维 CCD 阵列. 在 CCD 单元上形成的电荷量正比于入射光强, 这是 CCD 光学成像的基础. 对光生电荷给予定量描述是, 每个能量为 3.65eV 的入射光子可以产生一个电子, 一个 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 的阵列单元, 典型地阱深为 $3-5 \times 10^5$ 电子, 阱的深度正比于单元面积.

二、CCD 信息传送

CCD X-射线探测器大体上可分为两类, 一类是间接探测 X 射线, 另一类是直接探测 X 射线.

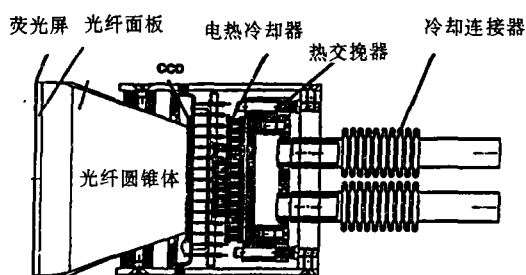


图1 CCD X射线探测器结构图

对于间接探测 X 射线的 CCD 而言, 探测器主要由如下几部分组成, 如图 1 所示. 一个允许 X 射线穿过且阻止可见光的窗, 接着是闪烁体或磷光体将入射的 X 射线转换成可见光, 例如, 在 APS 建造一个称之为“绿色”探测器 CCD 装置^[6], 采用的转换体为掺 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}:\text{Tb}$ 磷光体, 厚度约 $25\mu\text{m}$, 涂在 2:1 的光纤锥上, 光纤锥的小端与 CCD 耦合, CCD 产生的光电子由时钟-数字电路读出, 依次经放大, 数字化以及计算机处理. 但是, 对那些要求快速读取数据, 且要求高空间分辨的 X 射线衍射实验, 使用转换体是不利的. 因此, 还需要发展可直接探测 X 射线的 CCD.

对于直接探测 X 射线的 CCD 探测器而言, 其技术基础是 MOS-耗尽层深度获得的重要进步, 一个吸收深度为 $100\mu\text{m}$ 的硅可阻止 8keV X 射线. 当前大部分商业上的 CCD 耗尽层厚度为 $4-15\mu\text{m}$, 尽管耗尽层是如此的薄, 直接探测 $10-20\text{keV}$ X 射线的量子效率仍然

可以达到 5—15%. 用目前加工技术制备 $50\mu\text{m}$ 厚耗尽层是没有问题的, 这样厚的耗尽层器件使量子探测效率接近 100%, 当然这要以牺牲一些空间分辨率为代价. 到目前为止, 大多数 CCD 成像系统仍然是采用间接探测 X 射线技术.

CCD 作为科学目的 X 射线成像系统, 简称 CCD 相机, 种类繁多, 这里仅以法国 ESRF 同步辐射光源科学共同体需求的 CCD 相机为例, 主要有三种类型: (1) 慢速扫描相机. 它的主要参数是空间分辨和动态范围. 对于商业上销售的系列, 其分辨本领有 1000×1000 pixels (点阵, 或叫象素), 2000×2000 (点阵), 动态范围大到 16bits, 读出时间在 5—30 秒范围; (2) 快速扫描系统. 这种系统具有的成像速度每秒钟几幅, 空间分辨本领为 10^6 点阵, 动态范围至少为 5000:1. 在典型的衍射实验中, 适当选择曝光时间, 可以把读出时间降到 0.1 秒; (3) 超高速成像系统. 这种系统每秒钟能够提供数百张画面, 当然, 这要以牺牲空间分辨本领和动态范围为代价. 为了得到实时信息, 一些技术先进的实验室研制的 CCD 相机, 可以使 CCD 阵列传送数据的时间降到几百纳秒, 能承担单束团周期 $\sim 3\mu\text{s}$ (APS) 的测量, 这是比较理想的.

三、CCD X 射线探测器的应用

每个有生命力的事物都与其自身具备的特点和优点紧密地连系在一起, CCD 探测器亦不例外. 主要特点如下:

(1) 高灵敏度.

CCD 的灵敏度比灵敏胶片还要高出很多, 因此不需要光增强器就可以工作. 除了对可见光灵敏外, 对红外 (波长范围 $0.4-1.1$ 微米) 也灵敏. 通过增大耗尽层的厚度, CCD 可以直接探测 X 射线.

(2) 抗辐照能力强

所有用于直接 X 射线探测的硅器件都会受到不同程度的辐射损伤, 能量范围为 $5-20\text{keV}$ 的 X 射线的辐射损伤, 在氧化层中出现陷阱, 主要效应是增加暗电流. 在实际应用中, 辐射损伤对 CCD 影响很小. 它与高能粒子和 γ 射线引起的损伤不同, 高能粒子辐照损伤是破

声光多普勒效应公式的统一

路 峻 岭

(清华大学物理系 北京 100084)

当波源与观测者之间有相对运动时,观测到的频率与波源发出的频率不同的现象称为多普勒效应,它是由奥地利物理学家多普勒于1842年首先发现的.后来,光波的多普勒效应也在实验中被观测到.然而,声波和光波的多普勒效应公式具有不同的形式,例如,观测者 D 静止,波源 s 以速度 v_s 趋向观测者 D 运动时,波源 s 发出的频率 f_s 与观测到的频率 f_d 之间有以下关系.

$$\text{对于声波, } f_d = \frac{f_s}{1 - v_s/v} \quad (1)$$

式中 v 为声速;

$$\text{对于光波, } f_d = \sqrt{\frac{1 + v_s/c}{1 - v_s/c}} f_s \quad (2)$$

式中 c 为光速.

两种波的多普勒效应公式形式上的差异是说明两种波各自遵从不同的规律呢,还是这两种形式是一种普适的多普勒效应公式在不同条件下的特例呢?回答是后者.本文试从把多普勒效应理解为波的频率的洛仑兹变换出发;推导统一的,既适用于声波也适用于光波的普适的多普勒效应公式.

坏晶格,而晶格损伤是很难得到恢复的.能量范围在5—20keV的X射线对CCD的辐射损伤可以通过紫外线照射,或者用简单加热退火处理就能得到恢复,使CCD具有长的使用寿命.

(3)大面积高分辨率

这里仅以美国APS实验室研制的“GOLD”探测器为例,它的灵敏面积为 $150 \times 150 \text{mm}^2$,分辨本领为 3072×3072 点阵(象素),空间分辨率为 $75 \mu\text{m}$,探测量子效率为82%,读出时间1.8秒.它是目前性能比较好的CCDX射线探测器.

CCD探测器在新一代同步光源研究中的应用主要有:(1)生物大分子和蛋白质结构研究.因为生命科学是本世纪和下个世纪重点科研课题之一;(2)Laue衍射图.随着巨型计算机的出现,大大地增强了实验数据的处理能力.因此就有可能用Laue方法有效的解出晶体结构来.可以节省许多实验时间.这对生命科学和材料科学都是非常重要的;(3)X射线散射实验.测量高分子聚合物和生物样品的散射强度,以及时间依赖的动态过程,对于了解物质的

结构和性质是很有兴趣的课题.除此而外,CCD还是一种好的粒子探测器,在医学成像,图象传送,夜视仪器等方面都有许多应用.这里不予多述.

对CCDX射线探测器而言,正面临着发展的机遇和有力的挑战.第三代同步光源的建造为发展CCD带来机遇,同时,由于其它众多探测器的发展也向CCD提出了挑战.蛋白质晶体学和医学成像领域的一个重要要求,是增加CCD灵敏面积,利用光纤耦合CCD阵列,或者采用大面积像增强器的办法可以解决这个问题.CCD面临的另一个挑战是高空间分辨率,目前CCD最小单元尺寸是 $6.8 \times 6.8 \mu\text{m}$,如果在第三代同步光源的Undulator(波荡器)上研究X射线相干问题,就会用到光子关联谱仪.由此,高空间分辨率就是相干X射线探测所必须的,它将促进高分辨率CCDX射线探测器的发展.作为同步辐射研究的一种实验手段,CCD也不是完美无缺的,能量分辨很差.我们深信,随着时间的推移,CCDX射线探测器必将在同步辐射研究中发挥更大作用.