

# 位置灵敏探测器

## 在同步辐射实验中的作用

——王德武——

众所周知, BEPC (北京正负电子对撞机) 正在建造之中, 这台加速器的电子能量为  $1.6\text{GeV} \sim 2.8\text{GeV}$ . 它将是我国高能物理实验和同步辐射实验强有力的武器.

当电子在贮存环中受磁场力作用时, 沿着与圆轨道及磁场相垂直的方向上加速, 就有电磁波辐射出来, 人们称为同步辐射. 这种新光源具有常规 X 射线源无法比拟的优点, 因此, 吸引着物理学家、化学家和生物学家献身于同步辐射研究.

生物学家把 X 射线衍射和散射技术用于蛋白质结构研究已有几十年的历史了, 然而在常规 X 光源上采集数据, 一次实验就得花费十几天到几十天, 甚至用数年的时间去测算一个病毒的结构. 近几年, 人们把高能物理中的实验技术和实验仪器用到同步辐射的研究领域, 如电子学面探测器(多丝正比室、硅条阵列探测器等)取代了古老的照相乳胶, 使收集数据的时间缩短了几十倍, 乃至数百倍. 加之同步辐射光的强度比普通的 X 射线源大 2—3 个量级. 利用这样强的 X 射线作探针, 可做分子态变化的动力学研究, 这是常规 X 光源所望尘莫及的.

不同的实验对探测器的要求是不同的, 同步辐射散射、衍射实验要求位置灵敏探测器不仅能测出粒子的强度, 还要知道其坐标. 散射实验要记录高强度散射光子、衍射实验要记录 X 射线在样品上产生的衍射花纹, 要求探测器有较大的面积. 按照探测器能够给出坐标的维度, 可以分为一维和二维两种, 一维探测器包括正比计数管, 一维多丝正比室, 线阵 CCD 装置; 二维位置灵敏探测器包括二维多丝正比室、照相底片, 快慢扫描电视, 称为 CCD 的电荷耦合装置, 光二极管阵列等.

一个理想的位置灵敏探测器应具备以下几个重要指标: (1) 高的空间分辨率. 它的精确准直辐射束的半高宽 (FWHM) 来量度. 一般位置灵敏探测器的线分辨率从 400 微米到 30 微米范围变化, 而固体探测器的分辨率可高达 25 微米; (2) 高计数率本领. 因为导致测量不准确的主要原因是高通量下探测器的饱和. 正比计数管和多丝正比室的饱和水平依赖于探测器的计数率本领(大约  $10^6$  粒子/秒·厘米<sup>2</sup>), CCD 装置等积分探测器的饱和水平则依赖于探测器吸收辐射的总量; (3) 高的探测效率. 要求探测器对 X 射线有较高

的量子探测效率, 而且在整个灵敏面积范围内灵敏度是均匀的; (4) 探测器的空间分辨率和灵敏度应该是稳定的, 不随时间变化. (5) 探测器要有适当的能量分辨率. (6) 探测器要做到尽量小的视差. 由于视差导致倾斜入射的 X 射线位置的不确定. 因此为满足实验要求, 探测器灵敏部分的厚度应尽量小.

所有探测器工作都是基于入射在探测器上的辐射产生电离事例, 即产生自由电子或光电子, 或者在半导体里产生电子-空穴对. 无论是哪种探测器, 它们都分属两个基本组: (1) 计数探测器. 它们对每个入射的 X 光子都产生一个独立的信号; (2) 积分探测器. 它们固有的把辐射积分起来, 在有限时间内, 它们只能产生一个与总强度成正比的信号.

古老的照相乳胶作为位置灵敏探测器有着极其光辉的历史. 谁都知道, 贝克勒尔就是用它发现放射性的. 至今在核物理实验、同步辐射中小角散射及衍射实验中仍在发挥着作用, 它所具有的无与伦比的空间分辨率(小于 10 微米)依然占有相当的优势. 然而, 要获得一个晶体样品的适当衍射花纹最少需要 10~100 秒的曝光时间. 此外, 它固有的本底灰雾对测量精度不利. 当科学家们把诸如多丝正比室、CCD 装置等电子学面探测器应用于同样的实验, 欲达到同样的结果, 曝光时间只需百分之一秒到千分之一秒, 而且没有累积本底带来的困难. 当人们用光子通量为几倍· $10^7$  秒做生化分子溶液的衍射实验时, 就有可能引伸出生物化学反应机制的新见识. 用小角散射实验中的停流技术可以用于研究大分子系统的离解过程和缩合过程, 其时间分辨率可达到毫秒量级. 在这类实验中要求位置灵敏探测器具有高计数率本领, 配有快的数据处理设备和存贮设备. 多丝正比室具有高空间分辨率和大灵敏面积, 是同步辐射实验中重要探测器之一.

积分型 TV (电视) 探测器. 与单光子计数探测器相比, 积分探测器有个主要优点: 它们没有计数率的限制, 这使电视探测器在很强的同步辐射源实验上应用更有优越性; 它们的缺点是可用的摄像管尺寸太小, 以及相对空间分辨率受到限制. 在实际应用中发展了象增强器和电视摄像管综合系统(参见图 1). 它的工作过程是: X 射线摄像打在象增强器的闪烁体(如, ZnS) 上, 闪烁体吸收 X 射线发出可见光, 光导纤维把闪烁体内产生的可见光传送到电视摄像管的光阴极.

实验上要求闪烁体必须有很高的转换效率和很短的发光衰减时间。此外,闪烁体的涂层应该均匀、薄。使用 TV 探测器扫描一幅完整的画面约花 20 毫秒的时间,每幅画面的象素单元可以多到 128,000 至 256,000。因此,要求计算机数据处理系统每秒钟接收  $10^7$  字数据量,画面动态范围高到 1 万比 1 的水平。

TV 系统的空间分辨率和多丝正比室差不多,即 400 微米左右。它有很高的计数率本领。但是,目前工业上能生产的电视摄像管直径只有 40 毫米,这种尺寸的限制,使 TV 系统有点逊色。

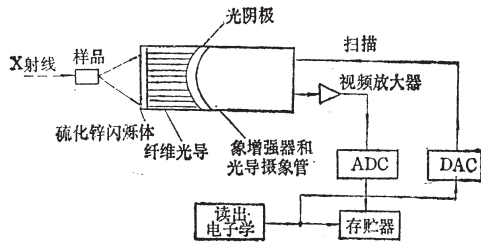


图 1 电视摄像管探测器示意图。

最近发展起来的另一种探测器是电荷耦合装置,通称 CCD。它是把单个光二极管联合起来构成的。这些光二极管阵列既可适用于一维结构,也可以适用于二维结构。一排排光二极管中的每一个都与一个电容和多路传输 MOS 系统连接,采用模数位片寄存器扫描图象信息。

实验证明,CCD 对直接 X 射线成象的灵敏度和动态范围都是远远不够的。为了克服这些缺点,可以利用闪烁体把 X 射线转换成可见光,以便满足实验对 CCD 灵敏度的要求。

CCD 装置的固有空间分辨率等于光二极管元件的宽度,约 25 微米。把 CCD 装置对于高强度 X 射线衍射花样探测是十分有用的。例如,美国 SSRL 同步辐射实验室用 CCD 装置监测生物学光束线 X 射线束的形状和尺寸。这种应用非常重要,因为光束线可以在很短时间内得到很精确的调整。

尽管 CCD 有令人感兴趣的优点,然而,由于饱和及读出噪音的缘故,它的非线性响应和低劣的动态范围,限制了它在高精度 X 射线实验中的应用。此外,CCD 的尺寸也做不大,线阵可做 2.5 厘米长,二维 CCD 的尺寸使用  $15 \times 15$  毫米,实验上要求尽早生产出更大尺寸的 CCD 装置。

在同步辐射实验中,微通道板(简称 MCP)作为软 X 射线和真空紫外光探测器也获得相当发展,它可以给出 10 微米的空间分辨率,计数率本领可达  $10^4$  光子/秒。可惜目前微通道板探测器只能做到  $26 \times 26$  毫米大小,工作可靠性还须进一步解决。不管怎么说,它也是一种有希望的探测器。