

第十五章 同步辐射原理与应用简介[§]

周映雪 张新夷

目 录

1. 前言
2. 同步辐射原理
 - 2.1 同步辐射基本原理
 - 2.2 同步辐射装置：电子储存环
 - 2.3 同步辐射装置：光束线、实验站
 - 2.4 第四代同步辐射光源
 - 2.4.1 自由电子激光（FEL）
 - 2.4.2 能量回收直线加速器（ERL）同步光源
3. 同步辐射应用研究
 - 3.1 概述
 - 3.2 真空紫外（VUV）光谱
 - 3.3 X 射线吸收精细结构（XAFS）
 - 3.4 在生命科学中的应用
 - 3.5 同步辐射的工业应用
 - 3.6 第四代同步辐射光源的应用
4. 结束语

参考文献

§ 《发光学与发光材料》（主编：徐叙瑛、苏勉曾）中的第 15 章：“同步辐射原理与应用简介”，作者：周映雪、张新夷，出版社：化学工业出版社 材料科学与工程出版中心；出版日期：2004 年 10 月。

1. 前言

同步辐射因具有高亮度、光谱连续、频谱范围宽、高度偏振性、准直性好、有时间结构等一系列优异特性，已成为自 X 光和激光诞生以来的又一种对科学技术和人类社会进步带来革命性影响的重要光源，它的应用可追溯到上世纪六十年代。1947 年，美国通用电器公司的一个研究小组在 70MeV 的同步加速器上做实验时，在环形加速管的管壁，首次迎着电流方向，用一片镜子观测到在电子束轨道面上的亮点，而且发现，随加速管中电子能量的变化，该亮点的发光颜色也不同。后来知道这就是高能电子以接近光速在作弯曲轨道运动时，在电子运动轨道的切线方向产生的一种电磁辐射。图 1 是当时看到亮点的电子同步加速器的照片，图中的箭头指出亮点所在位置。那时，科学家还没有意识到这种同步辐射其实是一种性能无比优越的光源，高能物理学家抱怨，因为存在电磁辐射，同步加速器中电子能量的增加受到了限制。大约过了二十年的漫长时间，科学家（非高能物理学家）才真正认识到它的用处，但当时还只是少数科学家利用同步辐射光子能量在很大范围内可调，且亮度极高等特性，对固体材料的表面开展光电子能谱的研究。随着同步辐射光源和实验技术的不断发展，越来越多的科学家加入到同步辐射应用研究的行列中来，同步辐射的优异特性得到了充分的展示，尤其是在红外、真空紫外和 X 射线波段的性能，非其他光源可比，很多以往用普通 X 光、激光、红外光源等常规光源不能开展的研究工作，有了同步辐射光源后才得以实现。到上世纪九十年代，同步辐射已经在物理学、化学、生命科学、医学、药学、材料科学、信息科学和环境科学等领域，当然也包括发光学的基础和应用基础研究，得到了极为广泛的应用。目前，无论在世界各国的哪一个同步辐射装置上，对生命科学和材料科学的研究都具

有最重要的地位。另外，利用同步辐射在微电子机械系统（Micro Electronic Mechanical Systems, 缩写为 MEMS）、功能材料、计算机和信息技术等高新技术领域，开展研究工作的份量也明显加重，这类工作常常被统称为同步辐射的工业应用。

本章将简要介绍同步辐射的基本原理，装置的构造及其在与发光学密切相关的一些领域中的应用。

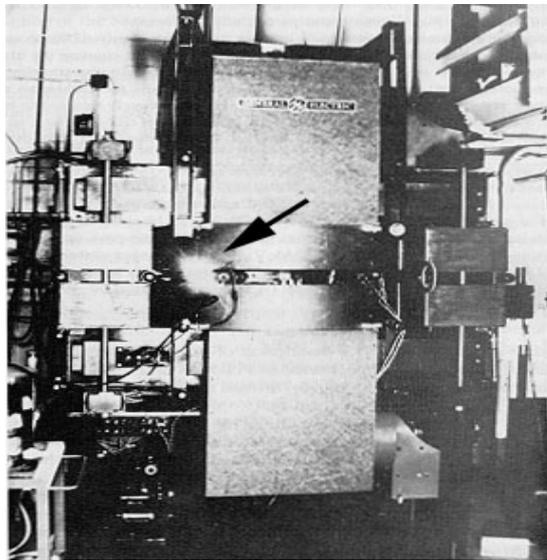


图 1 1947 年发现同步辐射的电子同步加速器照片

2. 同步辐射原理

2.1 同步辐射基本原理^[1-3]

1968 年，世界上第一台电子储存环能量为 240 兆电子伏（240MeV）的专用同步辐射装置，在美国威斯康星大学建造。据统计，全世界相继已有二十多个国家和地区，建成同步辐射装置 50 余台，都已投入使用，有十几台正在建设，另外，还有 15 台左右处于不同的设计阶段，正等待批准。北京正负电子对撞机国家实验室的同步辐射装置 (BSRF) 和中国科技大学国家同步辐射实验室 (NSRL)

的合肥光源 (HLS) 分别于 1989 年和 1991 年建成并投入使用, 台湾新竹同步辐射光源于 1994 年起对用户开放, 上海光源 (SSRF) 也即将在上海浦东张江高科技园区建造。

几乎同于 1947 年, 在英国曼彻斯特大学物理系, 师从布莱克特教授 (诺贝尔奖获得者) 的中国青年物理学者朱洪元, 在宇宙线研究中写成题为“论高速的带电粒子在磁场中的辐射”的论文, 并在英国皇家学会会刊上发表。这也是关于同步辐射的最早期论文。其实, 据《宋会要》记载, 早在公元 1054 年 7 月, 我国古代天文学家就观测到金牛座中天关星附近出现异象: “昼见如太白, 芒角四出, 色赤白, 凡见二十三日。”这是人类历史上第一次详细记载超新星爆发。这颗超新星爆发后的遗迹形成今夜星空的蟹状星云 (图 2)。现代天文学家确认该星云的辐射, 包括红外线、可见光、紫外线和 X 射线的宽频谱, 正是超新星爆炸产生的高能电子在星云磁场作用下产生的电磁辐射, 也即同步辐射。

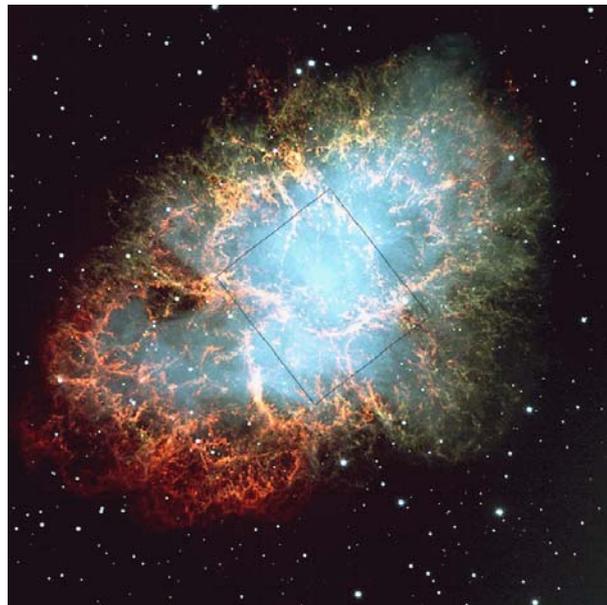


图 2 超新星爆炸后遗迹形成的蟹状星云

当高能电子在磁场中以接近光速运动时，如运动方向与磁场垂直，电子将受到与其运动方向垂直的洛仑兹力的作用而发生偏转。按照电动力学的理论，带电粒子作加速运动时都会产生电磁辐射，因此这些高能电子会在其运行轨道的切线方向产生电磁辐射。这种电磁辐射最早是在同步加速器上观测到的，因此就称作同步加速器辐射，简称同步辐射，或同步光。

同步辐射作为光源，其主要特点可归结为：1) 亮度高，譬如 X 光强度可以是实验室最好的转靶 X 光机的一万倍甚至一百万倍以上；2) 光谱连续且范围宽，可从远红外到硬 X 射线；3) 有时间结构，一般同步辐射光脉冲的脉宽为几十皮秒量级；4) 具有偏振性，在储存环轨道（即电子运行轨道）平面上同步辐射是 100% 线偏振的，而在储存环轨道平面的上方或下方取出的同步光则是左圆偏振或右圆偏振的；5) 同步光集中在弯曲轨道的切线方向一个极小的立体角内，具有准直性；6) 同步辐射的光谱可精确计算，故可用作标准去校正其它光源。图 3 是世界上最大的同步辐射装置，日本的 SPring-8 的同步辐射光谱亮度曲线，图中也给出了太阳辐射，转靶 X 光管以及医用 X 光管的光谱亮度曲线，以作比较。

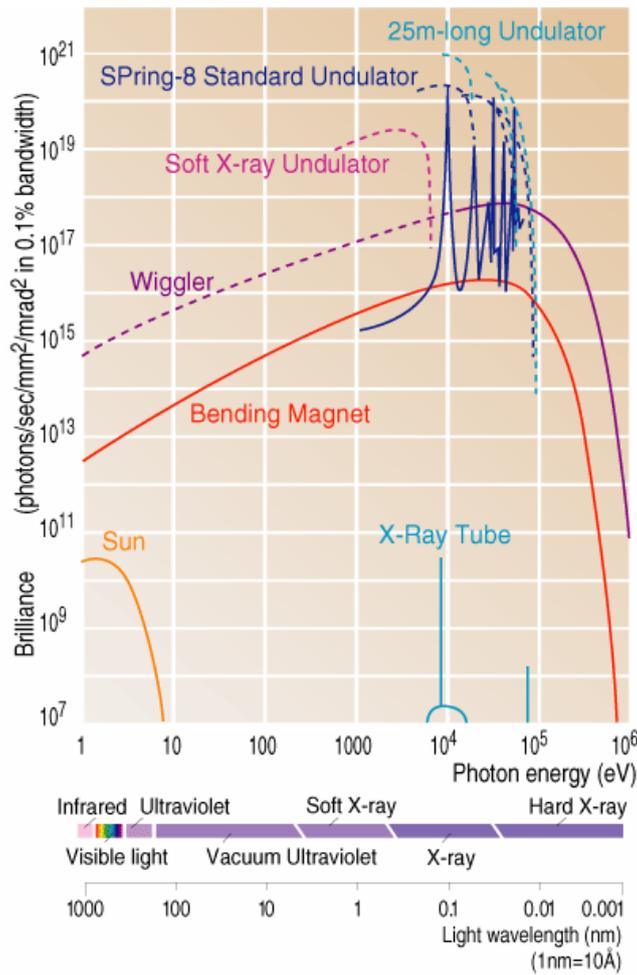


图3 SPring-8 同步辐射光谱亮度曲^[4]

2.2 同步辐射装置：电子储存环

以电子枪，如光阴极微波电子枪作电子束源，使电子束进入直线加速器和增能器(Booster)中被加速，再通过输运线把它注入到电子储存环中。储存环是一种超高真空的环形管道，环内安装有一系列磁铁：二极磁铁使电子束团偏转，改变运动方向（因此也被称作弯转磁铁）；四极磁铁和六极磁铁使电子束聚焦。电子束在经过弯转磁铁时，在弯曲轨道的切线方向产生同步辐射。另外，安装在储存环中的高频腔用以补充电子能量。图4给出了一个电子储存环的示意图。

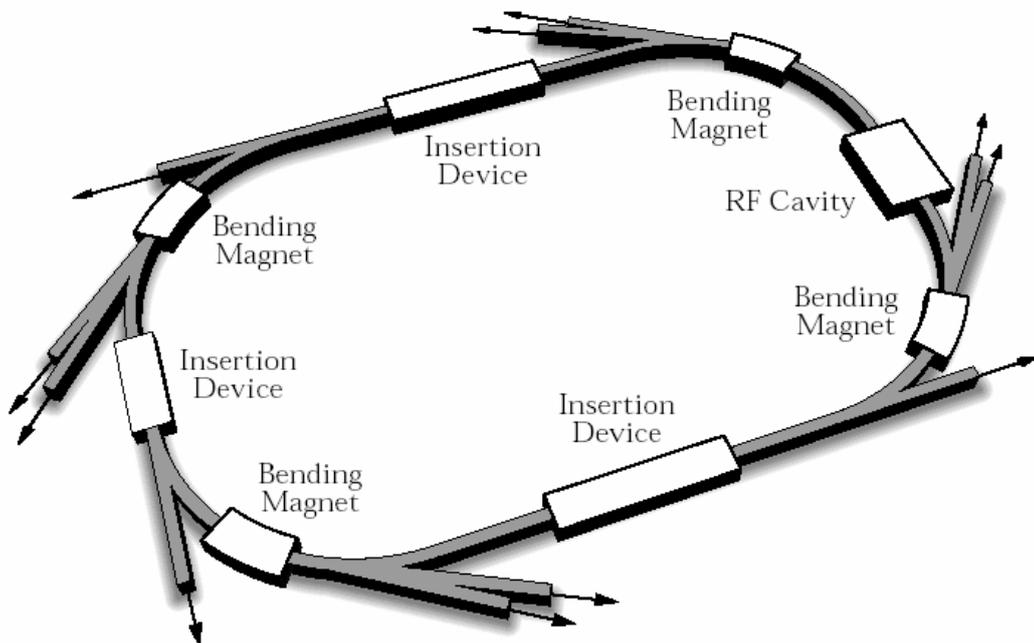


图 4 电子储存环示意图，图中未标出四极磁铁、六极磁铁和注入系统

一个同步辐射光源可选用的最短波长（最高光子能量）取决于储存环的能量和弯转磁铁的磁场强度，如合肥同步辐射光源的储存环电子能量为 800MeV，最短可用波长为 0.5 nm；而日本的高辉度同步辐射装置 SPring-8 的储存环电子能量是 8GeV，是目前世界上能量最高的同步辐射装置，其最短可用波长可达 0.01 nm（即能量高达 100keV 以上，参见图 3）^[5]。

高能物理学家在储存环上进行正负电子对撞实验的同时，发现电子因辐射而损失能量，对高能物理实验起负面的作用。但是，非高能物理学家却发现同步加速器产生的电磁辐射是一种性能优良的光源。于是，开始了人类历史上第

一次利用同步加速器上产生的同步辐射来做非高能物理的研究工作。这种在做高能物理研究的加速器上，同时开展同步辐射研究的工作模式，称为寄生模式或兼用模式，这就是第一代同步辐射光源。在中国科学院高能物理所正负电子对撞机上，电子通过长为 204 米的直线加速器，能量达到 2.2GeV，也可以在进 行高能物理实验的同时，以寄生模式开展同步辐射研究。美国威斯康星大学 1968 年建造的能量为 240MeV 的电子储存环，是世界上第一台专用同步辐射装置，也称为第二代光源。我国建在合肥中国科技大学国家同步辐射实验室(NSRL) 的同步辐射光源(也称作合肥光源,HLS),则是我国第一台专用的同步辐射光源。专用同步辐射光源在 20 世纪 70 年代得到了极大的发展。作为第三代光源,其主要标志之一是高亮度或低的电子束发射度 (electron beam emittance, 电子束团截面尺寸与其发散度的乘积)。电子束发射度越低,亮度就越高,通常认为电子束发射度在 20 纳米·弧度以下,即为第三代光源。表 1 列出的是一些同步辐射装置的电子束发射度,小于 20 纳米·弧度的为第三代光源。第三代光源的另一重要标志是在电子储存环的直线节上装有多 个插入件,如扭摆器(Wiggler),它由正、负极周期磁铁组成,目的是局部加大磁场,使电子通过它作扭摆运动而发出的同步辐射具有更高的特征能量;波荡器(undulator),它与扭摆器的区别是磁场较弱,但周期数多,使从不同周期得到的同步辐射,可部分相干地迭加,亮度与周期数平方成正比,使同步辐射的亮度大大提高。因此,通过插入件获得性能更优良(如相干或部分相干的准单色光,可与激光媲美)、亮度更高的辐射,它是同步辐射装置的发展方向。在图 3 中我们也可以看到扭摆器和波荡器辐射的光谱亮度曲线。

表 1 一些同步辐射装置的电子束发射度

同步辐射装置及所在地	电子束发射度 (纳米·弧度)
BSRF (北京)	390 (寄生模式) 76 (专用模式)
NSRL (合肥)	166 (高亮度模式运行时为 27)
SRRC (台湾新竹)	19
PLS (韩国浦项)	12.1
ESRF (法国, Grenoble)	3.89 (1.7@100mA)
APS (美国)	8.2
SPring-8 (日本)	5
SRRF (上海, 即将建造)	2.95 (设计指标)

依据电子储存环中电子能量的高低，储存环同步辐射装置又可分为低能、中能和高能三类。低能同步辐射光源的电子能量在 2 GeV 以下，储存环周长约为 100-200 米，得到的同步辐射主要是真空紫外和软 X 射线辐射。如 HLS 的电子能量在直线加速器中被加速到 200 MeV 后，通过输运线注入到电子储存环中，其电子储存环中共有 45 个电子束团（在储存环中由于自稳相作用，电子自动聚集而形成电子束团，每个电子束团包含几十亿个电子），所有电子都在周长为 66 米的储存环中被慢加速到 800 MeV，在电子储存环的弯转磁铁处产生同步辐射，在真空紫外和软 X 射线区都有很强的辐射，特征波长为 24 Å。而中能机器，储存环的电子能量选择在 2.5-4.0 GeV 左右，储存环周长在 200-400 米左右，同步辐射在 X 射线能区有很好的性能。BSRF 的电子储存环周长 240 米，能量在 2 GeV 左右，就是这类中能同步辐射光源，其同步辐射以软 X 射线和部分硬 X 射线为主，在真空紫外区也有很强的辐射。中能光源的造价和运行费用都比高能同步加速器低得多，而性能也可以很好，所以现在世界各国正在建造的都是

中能同步辐射加速器。将要建造的上海光源也是一台中能光源，储存环电子能量优化为 3.5 GeV, 设计周长为 432 米。高能区的同步加速器，储存环周长可达 1 公里以上。电子能量达 6–8 GeV，可以获得能量很高的硬 X 射线，目前世界上只有三台：法国 Grenoble 电子能量为 6 GeV 的欧洲同步辐射装置（ESRF）；美国 Argonne 国家实验室电子能量为 7 GeV 的先进光子源（APS），；以及日本原子能研究所和理化研究所共同筹建的电子能量为 8 GeV 的超级光子源(SPring-8)。这三台装置都已启用，装置的几个主要参数列于表 2。

表 2 世界上三个最大的高能同步辐射装置的几个主要参数

装置名称	欧洲同步辐射装置 (ESRF)	先进光子源 (APS)	高辉度同步辐射装置 (SPring-8)
建造国家	法国等 16 个欧洲 国家	美国	日本
电子能量 (GeV)	6	7	8
储存环周长 (米)	844.4	1104	1436
特征能量 (keV)	19.2	19.5	28.9
投入运行年代	1994	1996	1997

同步辐射光源的亮度有不同的表述方式，最常用的光源亮度定义为每秒、单位光源面积、0.1%能量带宽、在单位立体角内发出的光子数，因此亮度单位可表述为：光子数/(mm)²·(milliradian)²·sec·(0.1% bandwidth)。同步辐射光源亮度及与其它一些光源的比较如图 3 和图 5 所示。图 5 中同步辐射光源弯

转磁铁 (Bending Magnets) 和波荡器 (Undulator) 的亮度是美国 ALS 的数据, 分别约为 10^{15} 和 10^{20} 亮度单位, 而太阳辐射的亮度则为 10^{10} 亮度单位, 实验室 X 光管的亮度在 10^8 和 10^{10} 亮度单位之间。图中 LCLS (Linac Coherent Light Source), 即直线加速器相干光源, 我们在 2.4.1 节中将作介绍, 这是目前正在设计建造的基于直线加速器的第四代光源, 其亮度预计可高达 10^{24} 亮度单位以上。

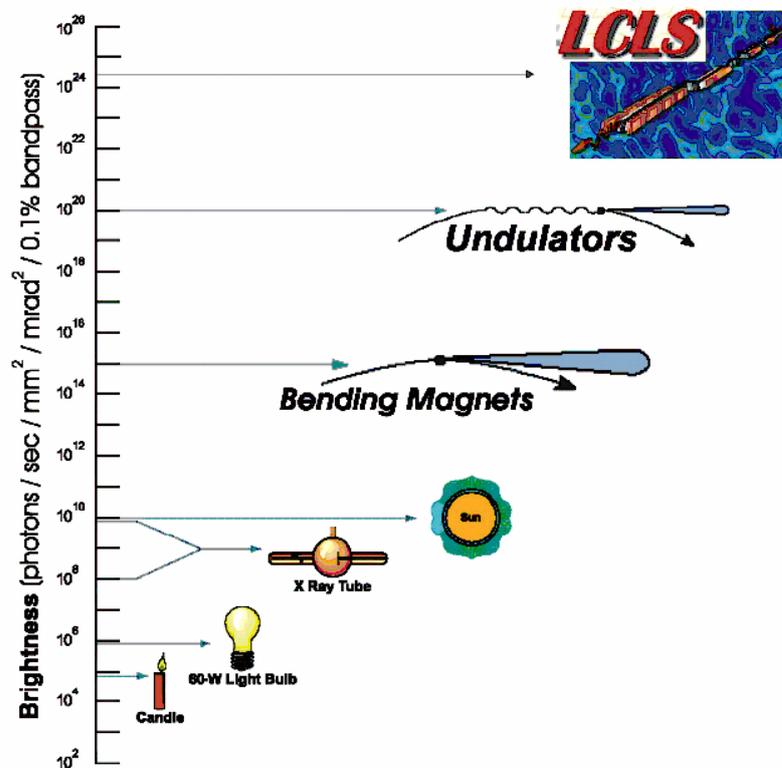


图 5 同步辐射光源与其它一些光源的亮度比较^[6]

前面已述, 在储存环中电子以电子束团形式存在, 因此同步辐射具有时间结构, 是光脉冲。束团都有一定的长度, 通常为几个厘米, 相应的光脉冲的脉宽为 100 ps 量级 (常常用光脉冲的宽度来表示束团的长度, 例如可以说, 束团的长度为 100 ps)。束团不能太短, 否则不稳定。为了得到更窄的光脉冲, 在

Advanced Light Source (ALS) 实验室, 人们利用飞秒激光与储存环中电子束团的相互作用, 可以从电子束团中“切”出很薄的电子束“片”, 可获得亮度虽比 FEL 辐射低, 但是脉宽窄到 300 fs (目前正在向 100 fs 逼近) 的超快 X 射线同步辐射^[7], 对开展时间分辨的动力学研究提供了强有力的工具。图 6 是获得 fs X 光脉冲的原理图, 一个 fs 激光脉冲与长度为 30ps 的电

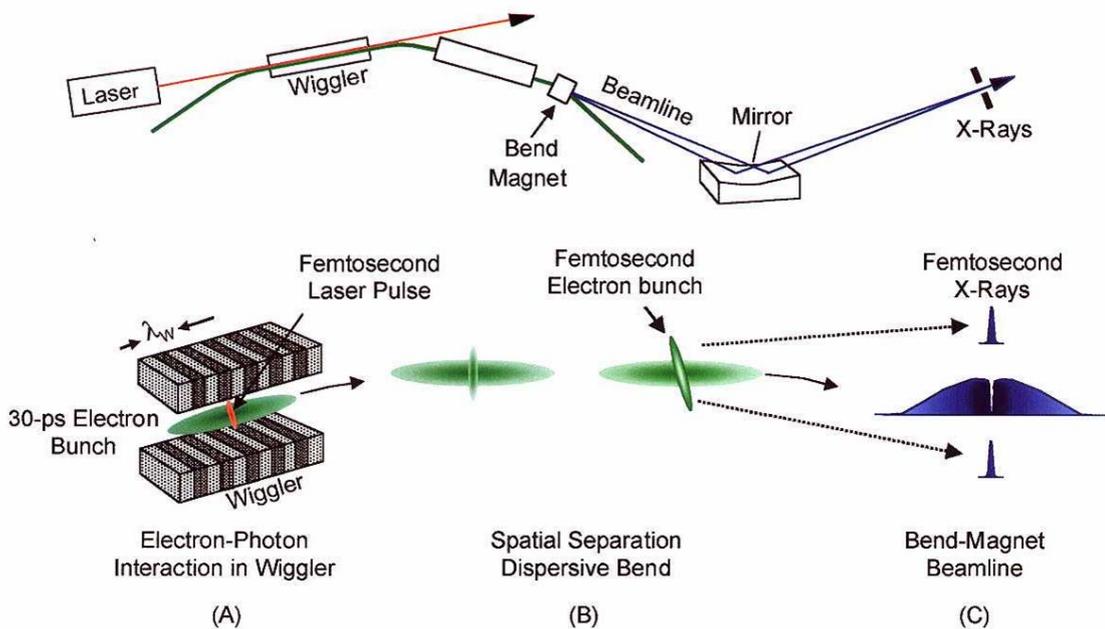


图 6 产生飞秒 X 光脉冲装置的示意图^[7]

子束团在插入件 Wiggler 中相互作用, 束团中的电子有的从光场得到能量, 有的失去部分能量, 并在空间上受到调制, 当经过弯转磁铁时, 一片厚度相当于 fs 的微束团被分离出来, 因而可以获得 fs X 光脉冲。

2.3 同步辐射装置：光束线、实验站

高能电子在电子储存环的优于 10^{-7} Pa (帕) 的超高真空中运行, 得到的同步辐射如何从电子储存环中引出, 并根据不同的应用研究领域和实验需要, 得到

或单色光、或白光、或偏振光，这就需在电子储存环的切向管壁加工称为前端的引出口，并设计光束线，光束线的作用主要是选择同步光的能量范围、分光和聚焦。光束线有很多种不同的类型，在真空紫外（VUV）波段，用光栅作分光元件，在 X 光波段则用 Si 或 Ge 单晶作分光元件。国家同步辐射实验室 VUV 光谱实验站的光束线采用的是 Seya-Namioka 型真空紫外光栅单色器，如图 7a 所示。图 7b 则是 SPring-8 编号为 BL01B1 的 XAFS 光束线示意图，用的是 Si 平面双晶单色器。

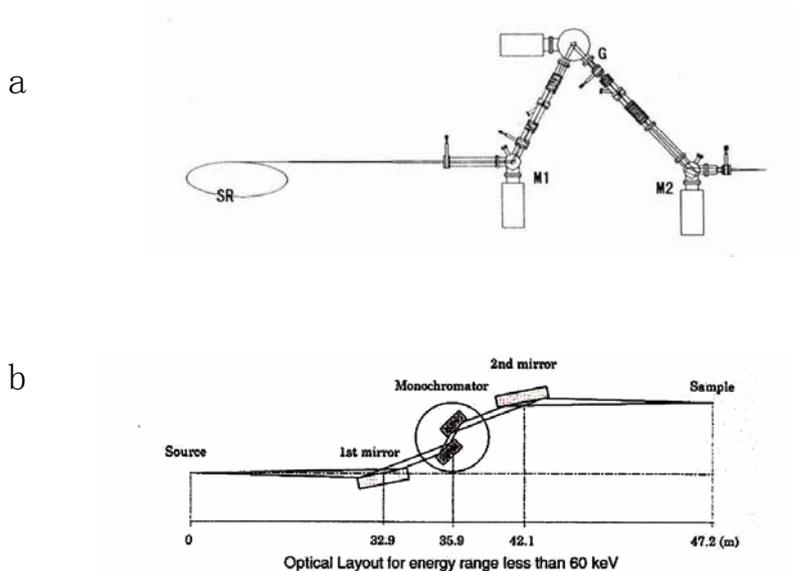


图 7 光束线示意图，a： NSRL VUV 光谱光束线，SR: 储存环;G: 光栅 M1: 前置镜 M2: 后置镜； b: SPring-8 工作在硬 X 射线波段的 BL01B1 光束线，图中数字为离光源点的距离，单位为米^[5]。

光束线的末端则与实验站相连。在实验站内配置实验研究所需的仪器设备，包括探测器、数据采集系统和控制系统等。不同领域的用户可选择合适的实验站开展研究。在储存环大厅内往往有一些铅砖的墙体(防护墙)，以防护强辐射，当然对中、高能加速器，辐射防护的要求更高，光束线和实验站分别被屏蔽在

能防 X 射线，并装有安全连锁装置的小屋内。

光束线的长度大约为几米到几十米，在 SPring-8 有一条光束线长达 1 公里，得到高亮度、相干 X 光，可用以研究物质（如细胞）的微细结构。前端区除了可引出同步光外，它的另一功能是保护储存环的真空，若光束线、实验站的某处真空有泄漏，真空连锁的传感器制动系统会在毫秒量级的时间内自动关闭前端区的阀门，以确保储存环的超高真空不被破坏。

2.4 第四代同步辐射光源^[8,9]

目前在光源领域，同步辐射主要是非相干光源，激光则基本上是波长固定的相干光源。因此，人们开始设想第四代同步辐射光源，或称先进光源，有别于性能已经十分优良的第三代同步辐射光源，即超高亮度的相干且波长可调谐的新光源，特别是在硬 X 射线波段。

2.4.1 自由电子激光

普遍认为可将自由电子激光（Free electron laser，简称 FEL）作为插入件，并从该插入件上引出在 X 光波段，具有极高亮度的相干辐射。自由电子激光分为由直线加速器驱动的自由电子激光和储存环驱动的自由电子激光两大类，尽管已经有了很多种不同的方案，但是目前仍处在设计和建造阶段，离开提供大量用户使用还有一定距离。FELs（细心的读者会发现，这里我们加了“s”，因为已经有很多 FEL 正在建设）产生波长可调谐的相干偏振光，具有强大的亮度和功率的潜力，其平均和峰值光谱亮度与世界上最先进的第三代同步辐射装置相比，分别高出约 4 个和 10 个数量级。这必然极大地拓宽了同步辐射应用领

域, 且对开展时间分辨研究、弱信号测量等, 都极其有益。

有一种在直线加速器 (Linear accelerator, 常常被称作 Linac) 上, 利用自发辐射的自放大 (Self Amplification of Spontaneous Emission, 简称 SASE) 效应获得自由电子激光的方案, 看来是非常有希望的。基本原理如图 8 所示。

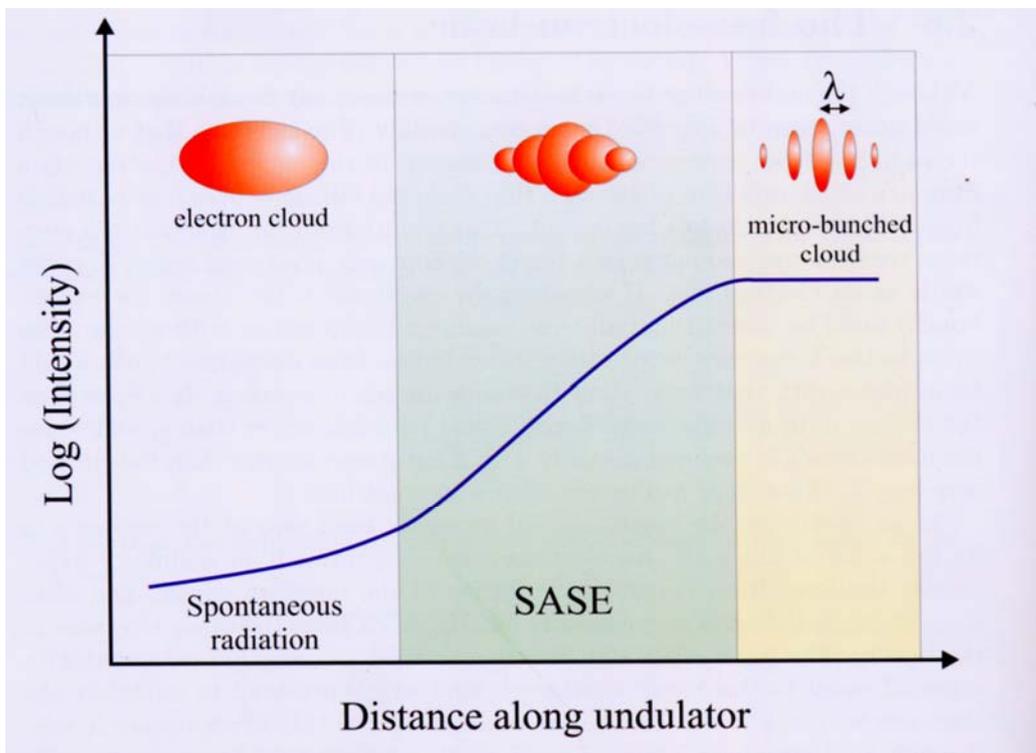


图 8 在长波荡器中一个电子束团辐射的强度变化: SASE 效应原理图^[9]

当一个电子束团 (在图 8 中被叫做电子云) 进入波荡器后, 在沿波荡器行进较短的距离内, 虽然单个电子的辐射是相干的, 但一个电子束团中各个电子的辐射, 相互没有关联, 因此这个电子束团的自发辐射强度与束团中的电子数目成正比; 电子在波荡器内继续前进, 每一个电子会受到来自其它电子的电场的相

互作用,束团内电子在空间上被周期性调制而形成微束团,开始出现 SASE 效应,辐射强度大大增加;最后,只要波荡器足够长,上述相互作用将使束团分成一些间隔等于 X 光波长的微束团,由于束团尺寸远小于其辐射的波长,一个微束团可以看作是一个点电荷,这时,每一个微束团的辐射与所有相随其后的微束团的辐射有相同的位相,因此在理想情况下辐射强度将与微束团中的电子数平方成正比。图 9 形象地描述了 SASE 过程:在波荡器内一个电子束团与光场相互作用,电子被光场“赶”成很多更小的团,产生群聚,形成微束团,因此使自发辐射放大,可以产生非常强的 X 光激光^[10]。

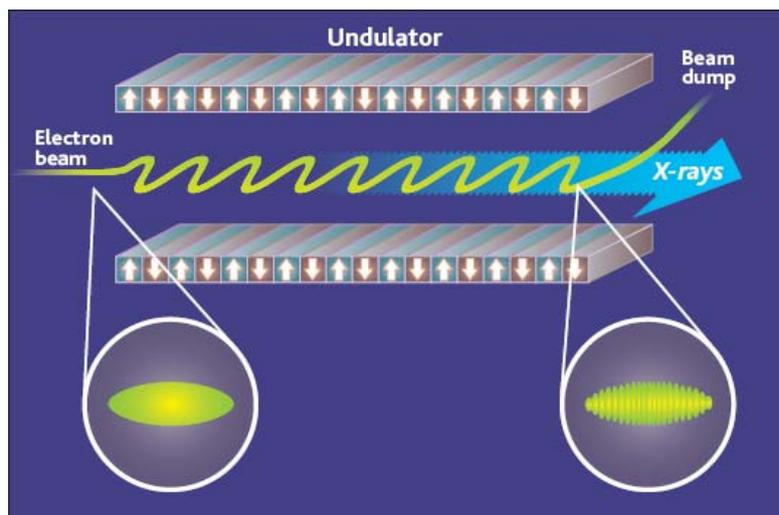


图 9 波荡器内一个电子束团与光场相互作用形成微束团

美国 Stanford 直线加速器中心(简称 SLAC)目前正在设计建造的基于直线加速器的自由电子激光,称作直线加速器相干光源(Linac Coherent Light Source, 简称 LCLS),就是利用 SASE 效应来实现的^[11]。从 SLAC 的直线加速器引出 15GeV 的高能电子束,并将其注入到一个 100 米长的波荡器中,高能电子

与它自己在波荡器中产生的光场相互作用而产生受激发射，以期获得峰值亮度比最亮的第三代光源高约 10 个数量级，脉宽为亚微秒的 X 光激光（图 10）。根据 John N. Galayda 于 2003 年 10 月 30 日提供的 LCLS 建设线路图，LCLS 将于 2006-2008 年间完成建设，2009 年初投入运行，供用户使用^[8, 12]。

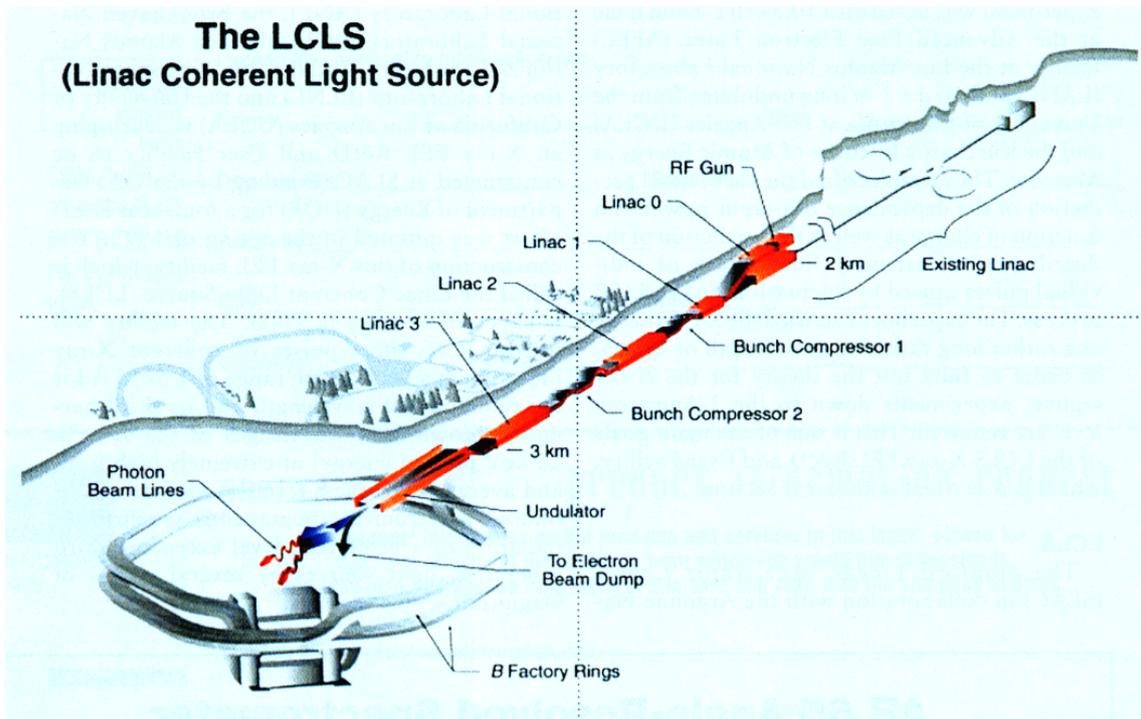


图 10 美国 Stanford 直线加速器中心正在建造的直线加速器相干光源^[12]

2.4.2 能量回收直线加速器（ERL）同步光源

光源还在不断改进，例如，磁极间隙更小、周期长度更短的真空气室内的插入件；超导高频腔；波荡器磁铁的垫补以增加高次谐波等。采取这些技术使得中能储存环光源也能产生很亮的硬 X 射线（5-50 keV）。然而作为储存环同步辐

射光源，有它固有的限制。从弯转磁铁出来的辐射与电子束必然会有相互作用，使电子束的能散增加，束团尺寸和发射度也都变大，所以亮度的进一步提高和光脉冲宽度变窄都受到限制。为了减少这些影响，要把弯转磁铁做短，磁场强度也要降低。这就需要更复杂的磁结构和更长的周长。美国、德国和日本的科学家正在设计能量在 6—8GeV，周长超过 2 公里的储存环，如能实现，将会产生极亮的 X 光，大大超过目前所有的装置。这种光源被称作极限硬 X 射线源 (Ultimate Hard X-ray Source, UHXS)^[13]，可以产生能量高达 500 keV 的硬 X 射线。人们不仅希望硬 X 射线亮度要高，而且光斑要小，最好能把 X 光聚焦到分子上。目前最好的第三代储存环光源，电子束团的尺寸只能到 50 ps 上下，显然不能满足这一要求。

能量回收直线加速器 (Energy Recovery Linac, 简称 ERL) 同步辐射光源^[14, 15]是另一类非常有前途的 X 射线源，与现有的任何一种储存环 X 射线源相比，它能产生亮度更高，脉冲更窄的 X 射线。其基本原理是这样的：直线加速器可以加速电子，也可以“减速”电子。当电子束团在直线加速器 (Linac) 中进行时，从 Linac 中的射频 (radio frequency, RF, 通常为 1000 MeV 量级) 电磁场获得能量而被加速，反之如果 Linac 从电子束团获得能量，则电子束团被减速 (也即 Linac 的能量得到了恢复)。图 11 是 ERL 同步光源的工作原理示意图。电子束加速到 15 MeV 后被注入到直线加速器 (图中的 Main Linac) 中，电子被加速直至满能量，通常为 3—8GeV (图 11 中为 5—7 GeV)，然后经

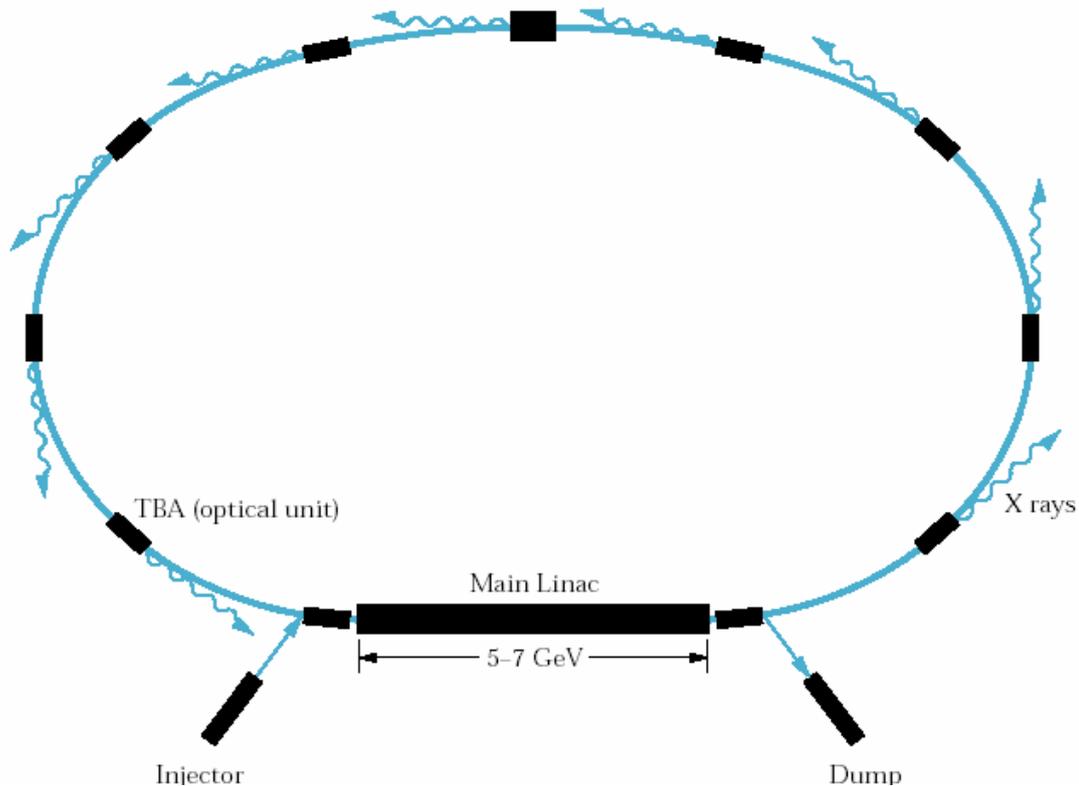


图 11 ERL 同步光源工作原理示意图^[14]

输运线送入波荡器，波荡器的长度为 2-25 m，就像第三代同步辐射光源一样，由波荡器产生 X 射线。仔细计算路径（周长），使电子束团再回到 Linac 的注入入口时，其位相正好与 Linac 的 RF 反相（相差 180° ），电子束团减速，Linac 则从束团获取能量，因此叫作能量回收直线加速器。建造 ERL 的关键是要有高的能量回收效率，因此要采用高 Q （品质因素）超导直线加速器。ERL 同步光源看上去和储存环同步辐射很像，其实并不一样。在储存环中电子是多次使用，而在 ERL 同步光源中，电子只转一圈，电子束发射度只取决于注入器，因此可以得到比储存环中的电子束团小得多的电子束发射度，束团尺寸也小得多。ERL

同步光源与第三代储存环光源的一些主要性能列于表 3，显然，ERL 基于直线加速器的同步光源在发射度和束团长度等指标，都大大优于储存环光源。

表 3 ERL 同步光源与第三代光源一些主要性能的比较^[14]

装置名称	能量 (GeV)	平均流强 (mA)	水平发射度 (纳米·弧度)	束团长度 (ps, FWHM)
ESRF	6	200	4	35
APS	4	100	4	73
Spring-8	8	100	6	36
ERL(低发射度)	5.3	100	0.15	0.3
ERL(非常低发射度)	5.3	10	0.15	0.3

基于直线加速器的 FELs 或硬 X 光源可以克服储存环光源固有的根本限制，以上介绍的直线加速器相干光源 (LCLS) 和能量回收直线加速器 (ERL) 同步光源或许会在不久的将来代替储存环同步辐射光源。从上一世纪初，人们开始制造直线加速器加速粒子，以研究物质结构。为了得到高能粒子，直线加速器要做得很长，不经济，后来逐步发展到回旋加速器和同步加速器，让电子转圈，这当然是很聪明的想法。于是，到 1947 年，在同步加速器上发现了同步辐射，这个对高能物理学家来说是进一步提高电子能量障碍的“坏东西”，却被许许多多的科学家用来造福人类，它原本是一种性能非常优良的光源。只经过 30 年左右的时间，人们又发现，储存环光源有它固有的不足，成为进一步提高光源性能的障碍。科学家们又把眼睛转向了直线加速器，因此才有了 LCLS 和 ERL 等令人难以置信的、诱人的超强光源，在二十一世纪的前十年，梦想即将实现，亮度提高 10 个量级！这就是螺旋式的上升。

3. 同步辐射应用研究

3.1 概述

基于同步辐射的实验方法种类繁多，而且发展很快，不断有新方法、新技术出现，大体上可分为 VUV 和软 X 射线能区的谱学方法以及 X 射线吸收、衍射和散射两大类。前一类方法主要研究电子态，后一类方法则以了解原子结构为主。

同步辐射谱学研究包括：光谱、光电子能谱、光化学谱和圆二色、线二色谱等，开展表面和界面物理、原子分子物理、表面化学和化学动力学等方面的研究；利用同步辐射的光脉冲特性，进行时间分辨测量，在发光学领域，同步辐射为研究 X 射线发光材料和存储材料、真空紫外发光材料、等离子体显示等平板显示材料、有机电致发光材料、电子俘获材料、闪烁体、红外上转换材料、红外探测材料等新型功能材料和器件，提供了性能优良的光源。充分发挥同步辐射光源的优势，用集成组合技术^[16]制备材料芯片，提高发现新材料和优化材料性能的效率，并用同步辐射微束光源可进行材料芯片的性能检测。

同步辐射对材料的电子结构，即电子能量状态的研究是基础研究的又一重要领域。该领域中最重要技术首推光电子能谱。当光束入射到固体表面时，入射的光子将价带或者价带以下芯能级（原子内层电子形成的能级）上的电子“打”出固体，成为光电子，入射光子能量的一部分用于电子离开固体所需要的能量，其余部分则转化为光电子的动能。因此，在固体中电子所处的能量状态越低，电离成光电子后，其动能就越小，通过测量不同动能电子的数目，将得到关于价带和芯能级上电子能量状态的信息。这种方法称为同步辐射光电子能谱（SRPES）。采用同步辐射，入射光子能量连续可变，得到的信息比用常规光源测的光电子能谱多得多。SRPES 的重要贡献主要有两方面。一是利用角分

辨光电子能谱 (ARPES) 研究能带结构, 二是利用光电子能谱研究固体表面和界面。这是目前最活跃、最富有成果的研究领域之一。ARPES 是目前唯一能直接测定能带结构的实验方法, 对高温超导材料等强关联体系的研究作出了重要贡献^[17-20]。SRPES 适合于表面和界面研究的原因之一是光电子的逸出深度 (离固体表面的深度) 与其动能有关, 通过改变入射的同步辐射光子能量, 使产生的光电子有最小逸出深度, 从而得到很高的表面灵敏度。

X 射线衍射、散射与吸收精细结构研究, 极大地促进了生物大分子晶体结构与功能关系、以及包括长程和短程有序物质结构方面的研究, 同步辐射 XAFS 方法应用面非常广。应用 X 射线衍射解出生物大分子晶体结构, 不仅提高了效率, 而且提高了精度。在最近不到 10 年的时间里, 就有两项获得诺贝尔奖的研究工作与生物大分子晶体结构的同步辐射 X 射线衍射研究密切相关(参见第 3.4 节)。

软 X 射线显微成像技术和 X 射线全息术等, 对活体生物、医学样品进行分子、原子水平上的直接观察和显微成像, 分辨率可达 5-10nm。最近几年, 这一领域显得特别活跃。

X 射线深度光刻和 LIGA 技术, 作为一种超微细加工技术, 在超大规模集成电路 (IC) 工艺和超微细机械、光学元件加工技术等方面, 都有独特的优势和应用前景。

3.2 VUV 光谱

对稀土离子发光的研究长期以来一直限于 4f-4f 跃迁和 5d-4f 跃迁, 对更高的稀土离子的激发态能级了解得并不多。其中一个原因是缺少可以开展实验研

究的激发光源。显然，同步辐射光源在这一方面表现出了不可或缺的作用。Yingxue Zhou 等人在国家同步辐射实验室的真空紫外（VUV）光谱实验站，监测 Eu^{2+} 的发光，测量了光激励荧光材料 $(\text{Ca, Sr, Ba})_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}$ 和 $(\text{Ca, Sr})_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}$ 的激发光谱^[21]，如图 12 所示。除观测到 256nm 的激发峰外，在 VUV 区还有 112nm 和 136nm 的强激发带，因源于 Eu^{2+} 的基态到激发态的直接跃迁，其激发效率几乎比 256nm 的激发高一倍。

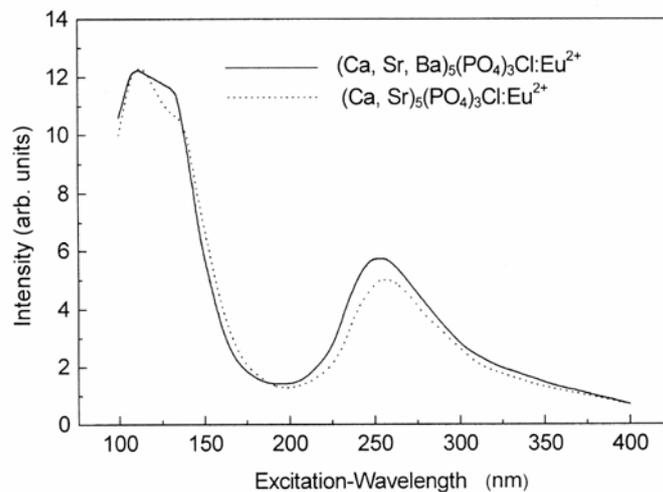


图 12 光激励荧光材料在 VUV 能区的激发光谱

Dieke 的稀土离子能级图已为大家所熟知，并广泛使用^[22]。它给出了所有稀土离子 40000cm^{-1} 以下的能级。近年来，对稀土离子在 $40000\text{--}70000\text{cm}^{-1}$ 之间的高激发态有了更多的了解，这主要是因为发现了很多新的激发光谱位于 VUV 能区的发光材料，人们对稀土离子更高的激发态产生了极大的兴趣。A.Meijerink^[23]等人利用同步辐射，发现了稀土离子很多新的高激发态能级。图

13 是一张新的稀土离子能级图^[24]，最高能级达到近 200000cm^{-1} ，大大拓展了 Dieke 稀土离子能级图的能量范围。当然还只是理论计算的结果，绝大部分能级尚缺少实验的佐证。

在宽禁带材料中掺杂稀土离子，利用其部分允许的 $5d \rightarrow 4f$ 跃迁，发光衰减很快，衰减时间常数可短至 10ns 。另外， Er^{3+} 或 Tm^{3+} 的 $5d \rightarrow 4f$ 跃迁的能级图是一个典型的四能级受激发射能级图， $4f \rightarrow 5d$ 吸收用作光学泵浦，效率可以很高，因此 Er^{3+} 或 Tm^{3+} 掺杂的氟化物可能是很好的制作 UV 和 VUV 可调谐固体激光器的材料，但是，要制备出高效的激光器，困难在于制备过程中常常会形成色心，它们会强烈地吸收激发光子或吸收发射光子。用软 X 射线同步光，仔细研究了 LiYF_4 中 Ce^{3+} ， Pr^{3+} ， Nd^{3+} ， Er^{3+} 和 Tm^{3+} 离子的 $5d \rightarrow 4f$ 跃迁的衰减动力学。发光衰减过程与基质到稀土离子的能量传递过程密切相关。另一方面，利用上述稀土离子发光的快衰减特性，它们也可用来做成闪烁体，发光产额与激发能从基质到稀土离子的能量传递过程以及发光的猝灭机制有很大关系，因为激发带位于 VUV 能区，所以也可以用同步辐射作为激发源来进行研究。Krupa 对这些工作做了很好的综述，有兴趣者可查阅参考文献[25]。

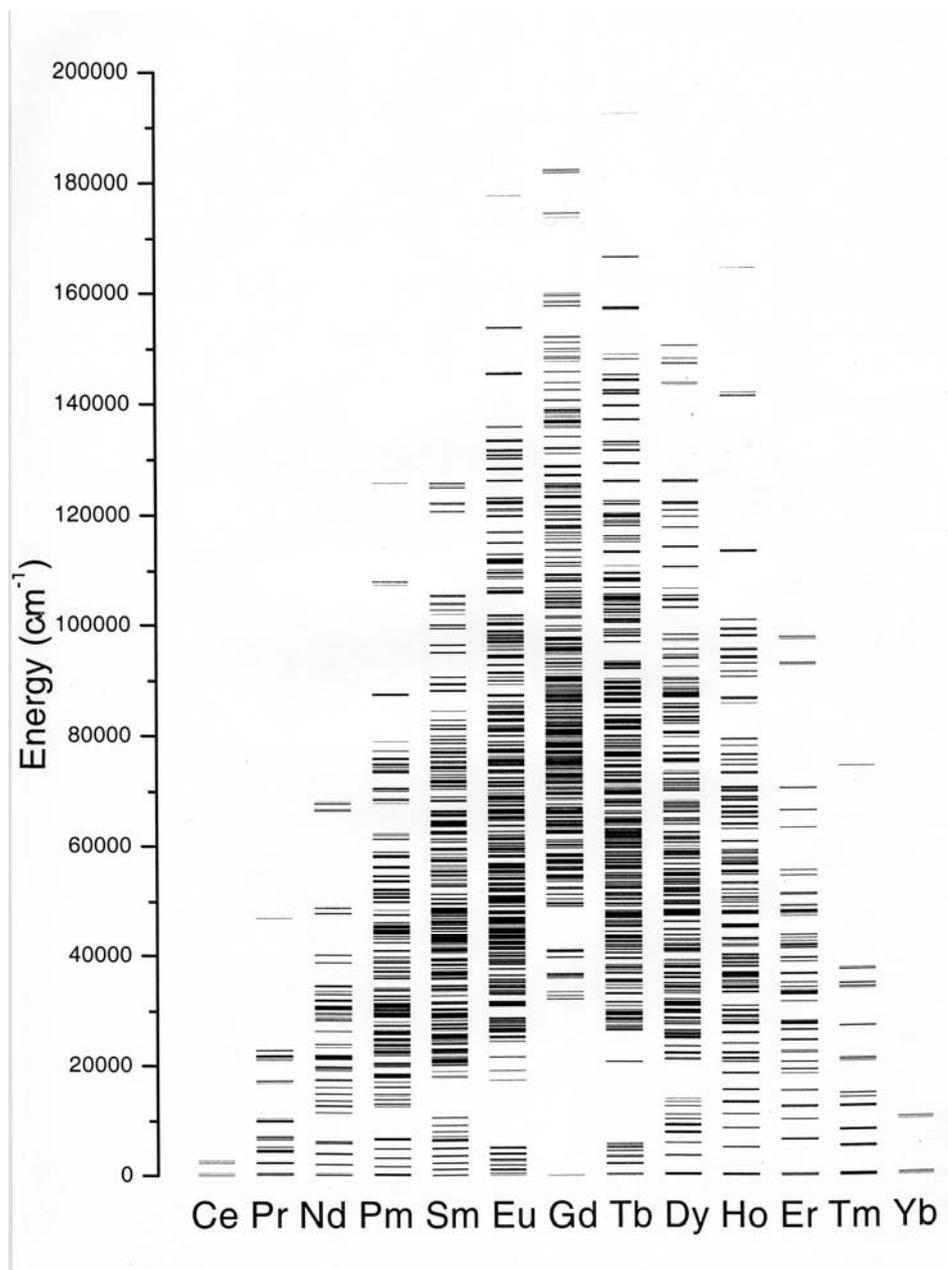


图 13 稀土离子的高激发态能级图

3.3 X 射线吸收精细结构 (XAFS) ^[26]

一个能量为 $h\nu$ 的 X 光光子入射到物体上，光子被吸收，同时激发出光电子。因为光子能量很高，那么被“打”出的这个电子可以是束缚得很紧的内层

电子。光电子离开吸收原子，以波的形式向四周传播，称其为出射波，当遇到周围其它原子时，会被散射，形成散射波。出射波与散射波发生干涉，X 射线吸收的偶极跃迁矩阵元受到调制，因此在吸收曲线上产生振荡，如图 14 所示。我们称吸收曲线的振荡结构为 X 射线吸收精细结构 (X-ray Absorption Fine Structure, 简称 XAFS)。显然 XAFS 与中心吸收原子的种类，周围原子的种类和数目 (称为配位数)，中心原子与邻近原子 (可以是第一近邻，第二近邻，等等) 之间的距离，即键长，以及邻近原子排列的无序程度等有关。经过对 XAFS 数据的仔细分析，我们可以得到配位数，键长和有序度等参数。我们把这些参数称作局域结构。对于长程无序，但短程有序的复杂

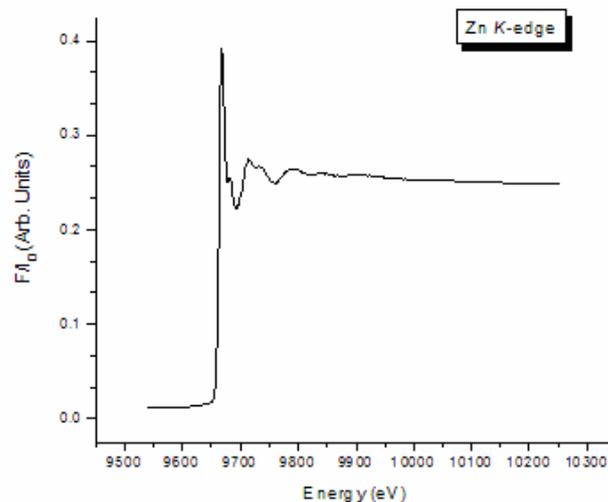


图 14 ZnO 薄膜在 Zn 原子 K 吸收边测量得到的 XAFS 曲线^[27]

材料体系，同步辐射 XAFS 技术非常有效，它可以告诉我们很多关于物质局域结构的信息。正是因为同步辐射的能量可调谐及高亮度，才使得我们可以在吸收

曲线上测量到本来是很弱的振荡信号。图 14 给出了 XAFS 测量的原理图。图中 I_0 为未被样品吸收的同步光强度， I 则为经过样品吸收后的光强，显然 I_0/I 即为样品的吸收。特别要指出的是，所有与吸收成正比的量都可以用作 XAFS 测量。例如，X 光荧光与吸收是成正比的，因此也可以测量 X 光荧光随入射光子能量的变化，如图 15 所示， F 为 X 光荧光的强度， F/I_0 则与吸收 I_0/I 成正比，我们把测量得到的 F/I_0 与入射光子能量的关系称作荧光 XAFS，而直接测量吸收的模式被称作透射模式。

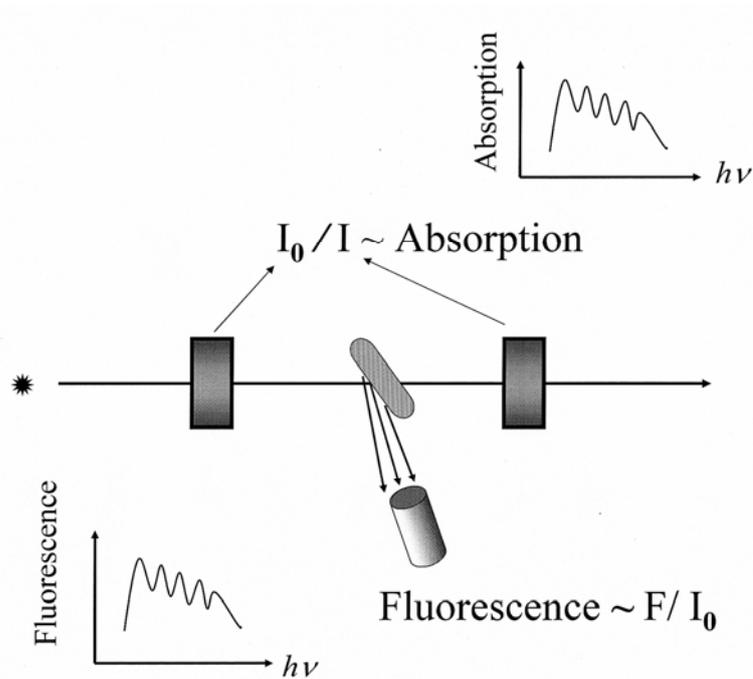


图 15 透射模式和荧光模式 XAFS 测量示意图

在研究物质内含量非常低的原子的局域结构时，荧光 XAFS 非常有效。另外对表面原子的局域结构，用掠入射荧光 XAFS 技术，可以有非常高的表面灵敏度。如图 16 所示， δ_c 为临界角，当入射角 $\theta \gg \delta_c$ 时，X 光可以穿透很深，所以我

们测量到的荧光 X 光有来自表面的，也有来自体内的。当采用掠入射模式时， $\theta \leq \delta_c$ ，X 光在表面全反射，所检测到的 XAFS 信号主要来自表面。

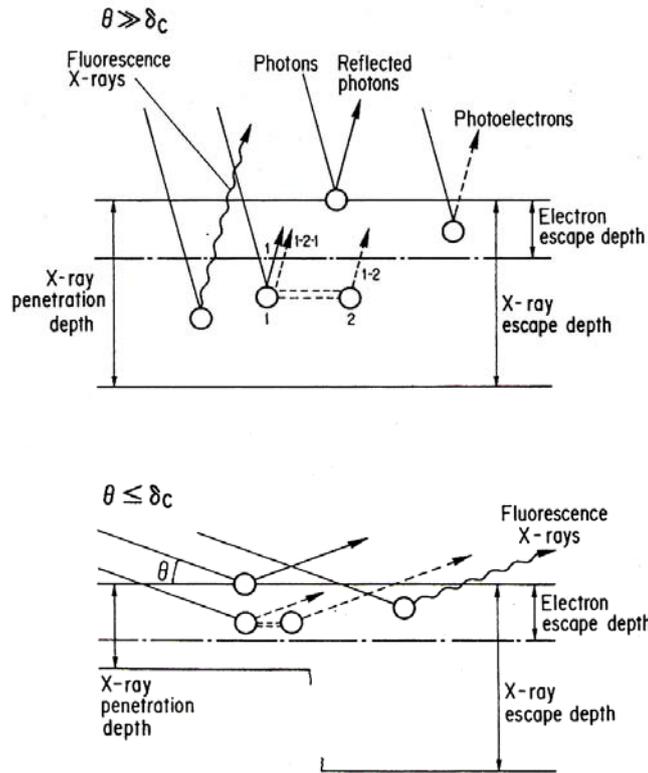


图 16 表面灵敏的荧光 XAFS 测量模式^[26]

3.4 在生命科学研究中的应用

同步辐射 X 射线既然比实验室 X 光管的 X 光强很多，一开始人们就利用它来开展 X 射线衍射的研究。从上世纪 90 年代以来，蛋白质晶体制备技术以及同步辐射实验技术和相应理论的发展，大大促进了蛋白质晶体结构研究的飞速发展。在这里，有两个非常重要的例子是值得向读者介绍的，它们是生命科学研

究中的两次重大突破。

第一个是关于一种被称作生命能量之源的酶蛋白三维结构的同步辐射研究^[28, 29]。在所有的生物中，从细菌、霉菌一直到高等动、植物，包括人类在内，ATP（三磷酸腺苷）都扮演了能量储运者的角色，而这是由其分子结构所决定的。在1940至1950年期间，实验证实了在植物中叶绿体的光合作用和线粒体的细胞呼吸作用中能产生大量的ATP。1960年Efraim Racker与合作者从牛心线粒体中分离出了“ $F_1 F_0$ -ATPase”，我们称之为ATP合酶（ATP Synthase，又称 $F_1 F_0$ -ATPase）。英国剑桥医学研究委员会分子细胞实验室的John Walker与美国科学家 Paul Boyer 因为对 F_1 -ATPase所进行的开创性研究工作而共同分享了1997年诺贝尔化学奖。关于细胞的能量转换机制一直是大家最关注的中心问题，细胞如何通过ATP合酶合成ATP成为各国科学家探寻解决的重要问题之一。1977年Paul Boyer大胆提出“结合改变机理（binding change mechanism）”，但始终没有实验的证明。John Walker和他的同事们，经过12年的不懈努力，在英国Daresbury实验室，与同事们一起利用同步辐射X射线衍射技术，得到了2.8 Å原子分辨率的 F_1 -ATPase的三维结构，与Paul Boyer提出的“结合改变机理”所预期的结构状态惊人地一致，为Boyer的设想提供了最有力的结构基础。无论是Paul Boyer关于旋转催化的大胆假设，还是John Walker对 F_1 -ATPase晶体结构的精确测定，都是对揭示生命能量之源做出的巨大贡献。他们两人因此分享1997年化学诺贝尔奖当之无愧。这里，我们必须指出，正是利用了高性能的同步辐射光源，使人们对 F_1 -ATPase分子结构的了解从低分辨率发展到原子尺度的高分辨率，从而获得能直接证明“结合改变机理”正确性的ATP合酶的三维结构。

另一个例子是关于膜蛋白离子通道的研究^[30,31] 今年 10 月份刚刚公布的 2003 年诺贝尔化学奖，因发现细胞膜通道而授予 Peter Agre 和 Roderick MacKinnon。人们很早就知道在细胞壁中存在一些分子或离子的通道，但对它们的结构和功能一直不清楚。1998 年，R. MacKinnon 公布了他领导的研究组在美国 Cornell 大学高能同步辐射光源(Cornell High Energy Synchrotron Source, 简称 CHESS) 得到的膜蛋白中 K⁺离子通道的原子水平的空间结构^[32]，这一结果震惊了整个学术界，他的发现解释了为什么 K⁺离子能进入通道内，而比 K⁺离子更小的 Na⁺则不能进入，他也使我们能够“看见”在不同细胞信号的作用下，通道可以开放或闭合，离子可以进入通道，也可以从通道中出来。这些结果与 P. Agre 发现的水分子通道一起开创了生物化学和生物学的全新研究领域—在原子水平上研究生物化学和生物学过程，如细胞之间的信号传递，很多疾病产生的原因，等等。

3.5 同步辐射的工业应用

近十年来，信息科学与技术以惊人的速度向前推进，同步辐射的应用起到了很关键的作用。这也是同步辐射工业应用中最活跃、最重要的一部分。在这里，我们介绍一个与发光学密切相关的同步辐射实验技术—全反射 X 光荧光。

大规模集成电路飞速发展主要标志是动态随机存取存储器 (DRAM) 容量的不断加大和微处理器 (MPU) 性能的不断改进。表 4 所示的半导体技术发展路线图，预见了半导体器件制造工艺在全世界范围的发展趋势。在不久的将来，即 2007 年，微处理器的最小线宽将达到 25nm，芯片的频率将达到 7GHz 左右。到 2016 年，我们相信表 4 所示的各项指标几乎已经达到了极限。

表 4 半导体技术发展路线图^[33]

年份	2003	2005	2007	2016
DRAM 的半特征尺寸 (half pitch, nm)	100	80	65	22
MPU 的线宽 (nm)	45	32	25	9
芯片频率 (GHz)	3.09	5.17	6.74	28.7

这是惊人的发展速度。在制备工艺方面，各道工序以及原材料带来的杂质原子的玷污必须保持在一个允许的最低限度之下，同步辐射全反射 X 射线荧光光谱 (SR-TXRF) 技术可以用来对半导体表面吸附的杂质进行快速、高灵敏、无损伤的定量检测。SR-TXRF 的测量灵敏度是常规实验室仪器的 50 倍以上。同步辐射的这一技术可以帮助我们制造出更高速运行的计算机。因为要求计算机的计算速度越来越快，半导体集成电路越来越复杂，这就需要在制作器件之前，对晶圆 (wafer) 表面进行非常严格的检查，保证玷污原子的数量在一个非常低的水平上。

当我们采用 SR-TXRF 技术测量晶圆表面极微量的杂质时，同步辐射 X 射线掠入射到晶圆表面，产生全反射，在这种情况下，X 射线只能进入到样品表面大约几十 Å 的厚度，因此来自硅衬底的 X 光荧光大大减弱，而来自于表面痕量元素 (表面污染) 的 X 光荧光则大大加强。图 17 所示是 Intel 公司的一个测量结果^[34]，低能端可见 Si 衬底的 X 光荧光，而高能端位于 10.93 keV 的强荧光峰则是激发光的弹性散射。从图中可见该晶圆表面玷污的 S、Cl、Cr、Fe、Ni 和

Zn 等原子的特征 X 光荧光。由于同步辐射的强度极高，目前可以达到的最低检测限为 10^7 原子/cm²，相当于 1 个硅原子单层上有一亿分子几个玷污原子，也能够被发现！

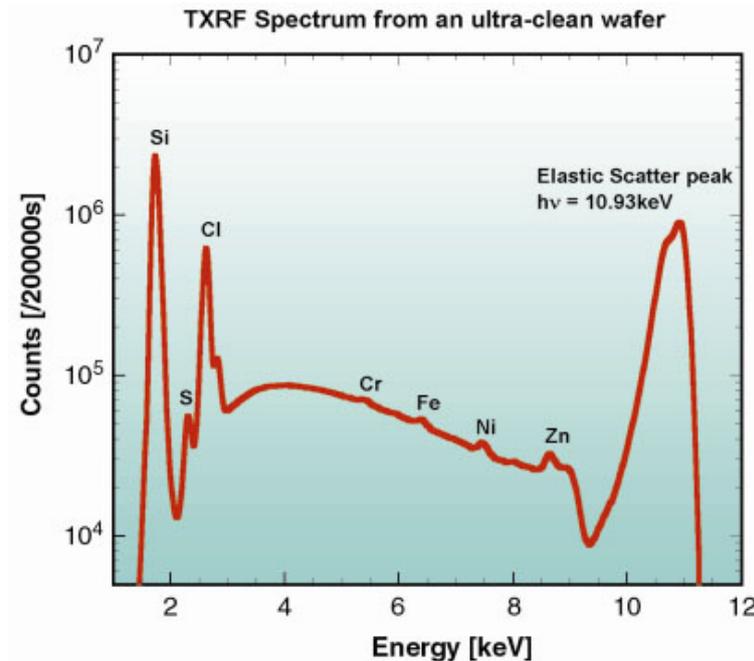


图 17 Intel 公司的 Si 晶圆表面玷污原子的 SR-TRXF 光谱

IBM 公司也作了类似的研究工作，图 18 是 IBM 公司的晶圆表面杂质的测量结果^[35]。同样是采用 SR-TRXF 技术，激发 X 光的能量为 11.2 keV，掠入射角为 0.085° ，入射光几乎与晶圆表面平行，从图 18 所示的 X 光荧光光谱很容易看到，该晶圆表面玷污的杂质原子主要是 Cl、Ag、Fe 和 Cu。

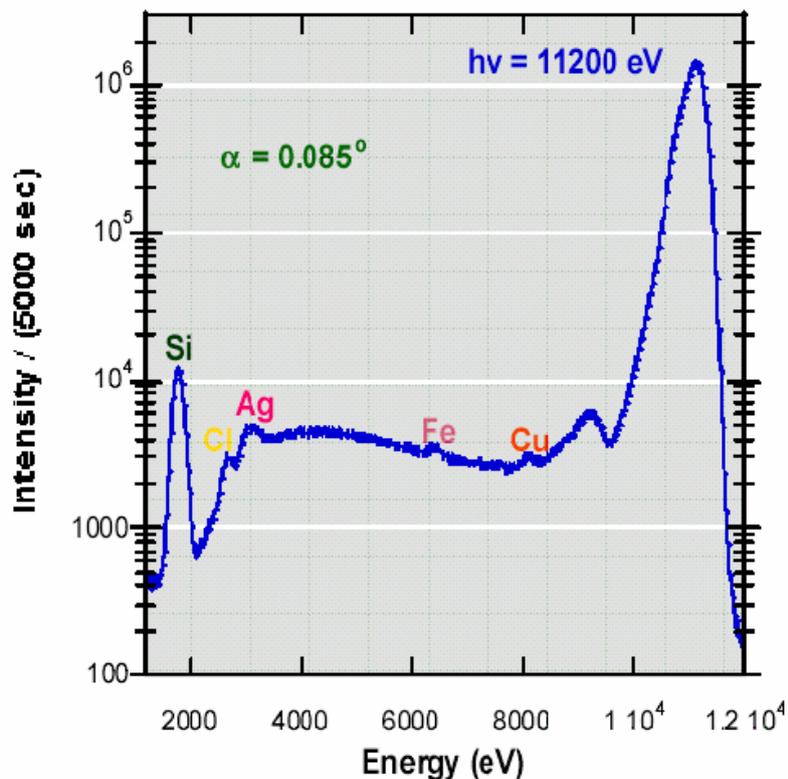


图 18 IBM 公司的 Si 晶圆表面玷污原子的 SR-TRXF 光谱

除避免和降低表面玷污之外，连线也是一个非常重要的环节^[36]。目前普遍采用 Al 合金，IBM 公司首先采用了 Cu 连线工艺，因为 Cu 的电阻较低，寿命也比 Al 长。但是用常规的等离子体刻蚀技术已经很难制作 Cu 导线。目前采用的 Cu 连线制作技术是将 Cu 沉积到预先制作好的沟槽内，这样可以得到纳米尺寸的 Cu 导线。由于所用材料和制备工艺都完全不同了，人们必须研究清楚 Cu 导线连接失败的机理，这对保证微处理器的可靠性是非常重要的。人们已经知道由于电流或是应力都有可能使 Cu 导线上的 Cu 原子发生迁移，而使导线“断裂”。

为了研究“断裂”的机理，通常采用扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）和 X-射线衍射（XRD）。然而，SEM 和 TEM 不能“看见”埋在半导体材料里的 Cu 线，而常规的 XRD 的空间分辨率大约是几十微米，也不能用来研究纳米尺度的 Cu 线。同步辐射微束（截面尺寸约为微米）可以穿透很深，“看见”埋在内部的 Cu 线，也可作空间扫描，“看见”Cu 原子是如何迁移的，为了能“看到”Cu 原子的迁移，有人在 Cu 线上沉积一小点 Ga，Ga 原子将随着 Cu 原子的迁移而一起被带走，这样根据 Ga 的特征荧光 X 光就可以“跟踪”Cu 导线中 Cu 原子的迁移了。

3.6 第四代同步辐射光源的应用

第四代同步辐射光源可以提供比目前世界上性能最佳的光源强 10 个数量级，脉冲短至 100fs 的硬 X 射线。可以说第四代同步辐射光源的应用主要就是 X 射线 FEL（XFEL）的应用。纽约的一位自由撰稿人 Navroz Patel 在 2002 年 1 月的 Nature^[37] 杂志上发表了题为“Shorter, brighter, better”的文章，激动地描述了这种强大的光源会产生的巨大影响。同年 5 月，Adrian Cho 也在 Science 杂志以“The ultimate bright idea”^[10] 为题，报道了 SLAC 这一激动人心的 LCLS 计划。利用常规的 X 光机和同步辐射光源虽然已经开始对单个分子进行 X 射线衍射实验，但因强度太低（同步辐射也一样），信号很弱，而不能得到有用的信息。而生物体是活的，一个蛋白质分子会和其它分子相互作用，而且随时间在变化，人们渴望能得到单一分子的 X 射线衍射。R. Neutze 等人^[38]，对单个酶分子和一个孤立的病毒进行了 XRD 的计算机模拟，其结果如图 19 所示。他们研究了生物分子在激光脉冲辐照下的损伤行为，强度很高的 XFEL 短脉冲，

完全可以克服现有 X 光源因强度太低而不能真正去研究单一分子结构的障碍，又有利于减少辐射损伤。我们期待着用 XFEL 来揭开单一分子结构的谜。Navroz Patel 提到的另外一个可能的应用是关于温密度物质(Warm dense matter, WDM)的研究。这是一种介于固态和等离子体之间的物质。在大行星的核心可以发现这种物质。在实验室里，可以用非常强的激光辐射在金属靶上产生 WMD。目前对 WMD 的了解还非常少。显然，强度比最亮的同步辐射还要高 10 个量级的 XFEL，对 WMD 的产生和有关性质的研究，是会大有用武之地的， FELs 产生的 X 射线强短脉冲一定会帮助人们获得新的信息。

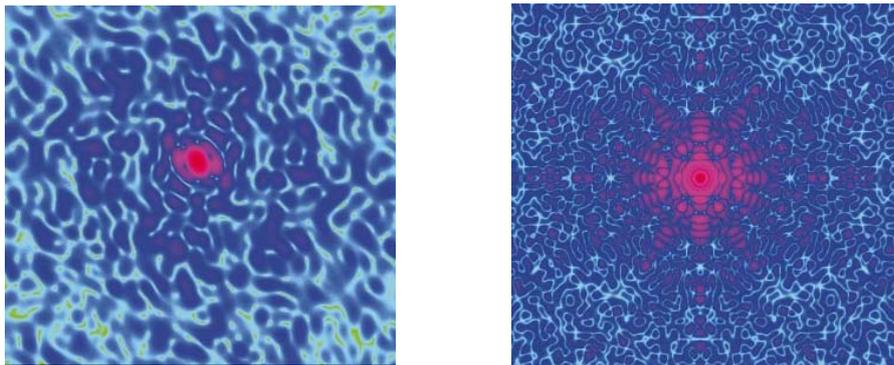


图 19 一种叫做溶解酵素(lysozyme)的酶分子(左)和蕃茄感染的病毒分子(右)的计算机模拟 X 射线衍射花样^[37, 38]

4. 结束语

同步辐射光源和同步辐射应用研究，经历了 50 多年的时间，已经达到非常成熟的阶段。从全世界来看，同步辐射用户队伍(user community)还在不断壮大。世界上很多同步辐射装置，都建设有几十甚至上百条光束线和实验站，每个装置每年都要为两、三千个用户提供同步光，开展实验研究。同步辐射应

用研究有两个很明显的特点。一是，学科覆盖面广，用户量大，它的发展影响许多方面；二是，同步辐射实验室是唯一有众多分属不同学科的科学家共同工作、频繁交流的场所，因而能有效地促进交叉学科和新兴学科的成长。可以相信今后的一、二十年内，会有大量重要的成果涌现出来，并很可能在以下几方面取得突破性进展。

- (1) 宏观量子现象和强关联体系。
- (2) 液态、复杂表面、软凝聚态物质等复杂体系的性质。
- (3) 艾滋病病毒等与人类健康密切相关的生物大分子结构与功能关系。
- (4) 以结构为基础的制药工业的成熟，并得以迅速发展。
- (5) 以微电子机械系统为基础产品的信息技术新产业的形成。

尽管同步辐射光源的性能已十分优良，用户仍然不断提出新的要求：更亮（亮度）、更强（光通量）、更快（脉冲更短）、更高（光子能量），以满足样品越来越小，体系越来越复杂，信号越来越弱等科学研究的发展趋势。这些需求正强劲地推动着同步辐射科学和技术的发展。第四代同步辐射光源的出现必将为科学研究和技术进步开创一个崭新的纪元。

参考文献

- [1] 洗鼎昌著. 神奇的光—同步辐射. 湖南教育出版社, 1994
- [2] 马礼敦、杨福家主编. 同步辐射应用概论. 复旦大学出版社, 2001
- [3] Als-Nielsen J, McMorrow D. Elements of Modern X-ray Physics. John Wiley & Sons Led, 2001
- [4] <http://www.spring8.or.jp>
- [5] Asian Beamline Handbook., Hiroshima University, Faculty of Science, January 14-16, 2001
- [6] <http://www-als.lbl.gov/>
- [7] Schoenlein R W, et al. Ultrafast X-ray Science at Advanced Light Source, Synchrotron Radiation News, 2001, **14** (1): 20
- [8] Kirk B, Winick H, et al. Beam Line, 2002, **32** (1)
- [9] Als-Nielsen J, McMorrow D. Elements of Modern X-ray Physics, John Wiley & Sons Led, 2001. 30-59
- [10] Cho A. The ultimate bright idea, Science, 2002, **296**: 1008
- [11] Pellegrini C, Stöhr J. ibid [8] P. 32
- [12] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls>
- [13] Elleaume P. ibid [8] P. 14
- [14] Gruner S M, Bilderback D H. ibid [8] P. 22
- [15] Bilderback D, et al. New Energy Recovery Linac Source of Synchrotron X-rays, Synchrotron Radiation News, 2001, **14** (3): 12
- [16] Xiang X D, Sun X et al. A combinatorial approach to materials Discovery, Science, 1995, **268**: 1738
- [17] Shen Z X, et al. Science, 1998, **280**: 259
- [18] Ronning F, et al. Science, 1998, **282**: 2067
- [19] Feng D L, et al. Science, 2000, **289**: 277
- [20] Lanzara A, et al. Nature, 2001, **412**: 510

- [21] Zhou Y X, et al. VUV spectrum of Eu^{2+} doped halophosphates, *Materials Science and Engineering*, 1999, **B68**: 48-51
- [22] Dieke G H. *Spectra and Energy Levels of Rare Earth Ions in Crystals*. Wiley Interscience, New York, 1968
- [23] Meijerink A and Wegh R T. *Materials Science Forum*, 1999, **315-317**: 11-26
- [24] 私人通信
- [25] Krupa J C, et al. *Proceedings of 14th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids*, Aug. 2003, Christchurch, New Zealand
- [26] Oyanagi H. *X-Ray Absorption Fine Structure*. Elsevier Science B.V., 1996
- [27] 周映雪等. 分子束外延生长 ZnO 薄膜及性能研究, *核技术*, 2003, **26(1)** : 9-12
- [28] <http://www.nobel.se>
- [29] 田 亮, 张新夷. *核技术*, 2003, **26** (1) : 2
- [30] <http://www.nobel.se>
- [31] 闫晓辉, 田 亮, 张新夷. 将刊登在 2004 年第一期《核技术》
- [32] Doyle, et al. *Science*, 1998, **280** (5360) : 69
- [33] <http://public.itrs.net/>
- [34] Barrett R, and Comin F. How synchrotron light can help develop faster computers, ESRF, Highlights 2001, P.107 and F.Comin, “How synchrotron light can help develop faster computers”, ESRF, Highlights 2001, P.107
- [35] Lüning K, et al. Looking at trace impurities on silicon wafers using synchrotron radiation, *SSRL Science Highlight*, December 2002
- [36] Hasegawa M. X-ray microbeam characterization of Cu wires, *SPring-8 Research Frontiers*, 2001B/2002A, P.97
- [37] Patel N. *Nature*, 2002, **415**: 110
- [38] Neutze et al. *Nature*, 2000, **406**: 752