

何多慧

一个大型的专用同步光源——合肥同步辐射装置将在中国大地上诞生。它作为一个应用广泛而技术先进的研究工具，必将对我国科学技术的发展起到重要的促进作用。

高能电子在磁场中循曲线轨道运动时，沿着轨道切线方向所发出的电磁辐射叫做同步辐射或同步光。由于具有天然准直、高强度、高亮度、光谱强度在很宽范围内平滑连续且可准确计算、高度偏振、脉冲时间稳定等优异的特性，它远远胜过任何普通的光源，成为科学家们长期梦寐以求的研究工具。虽然同步辐射研究的历史还很短，但却已经遍及生命科学、材料科学、超大规模集成电路光刻、固体物理、表面物理、原子物理、分子物理、化学、地质科学、辐射计量学、医学以及其他许多科学和技术领域，取得了丰硕的成果。目前世界上已有二十余台同步光源正在供同步辐射研究之用，但还远不能满足各方面与日俱增的需求，因此，还有近二十台专用同步光源正在建造或计划之中。

1978年初，中国科学院决定以中国科技大学为主建单位开始筹建我国的同步光源——合肥同步辐射装置，这是一台真空紫外光（VUV）和软X射线光源，目前，初步设计和预制研究工作已经完成，即将进入正式工程阶段。

设计简介

一、概述

图1是合肥同步辐射装置总体布局示意图。主体设备是一台能量为800兆电子伏，束流强度为300毫安的慢加速电子贮存环。用一台能量为200兆电子伏，脉冲流强50毫安的行波电子直线加速器作为注入器。电子枪发射的电子经直线加速器加速到200兆电子伏，再经束流运输线1传输，之后注入到贮存环。欲贮存300毫安的束流，注入时间约需2分钟。注入结束后，将用3分钟时间把电子从200兆电子伏慢加速到800兆电子伏，然后使电子维持这一能量，在贮存环

的环形超高真空室中长时间迴转，即贮存运行。电子迴转时沿轨道切线方向发出同步光，如果在光前进的道路上没有障碍的话，它将在轨道平面内形成一张薄薄的“同步光毯”，不过这“光毯”的正中“挖”去了由迴转轨道所围成的一个“洞”。但是，由于本装置产生的同步光的能量还不是非常高，贮存环真空室对它还不是透明的，因此，我们在真空室壁上开一些窗口，用光束线系统引出同步光来供各种研究工作之用。

由于电子迴转时会与真空中残留气体的原子、分子发生碰撞，电子之间会发生散射以及束流的各种不稳定因素，会使贮存电子逐渐丢失，经过约10小时（即本装置的束流寿命）后，贮存束流强度将衰减至最初的 $1/e$ ，相应地同步光的强度亦减弱至 $1/e$ 。这时的光强，对某些实验工作已显得不够，所以我们就丢掉这些剩余电子，而重新再进行一次新的注入。

如上所述，在10小时的工作周期里，直线加速器只有两分钟用于注入！而其余的时间使电子束通过束流运输线2而输送到电子实验区，供核物理实验和其他各种研究工作之用。直线加速器的弃束流是用束流垃圾箱来吸收。

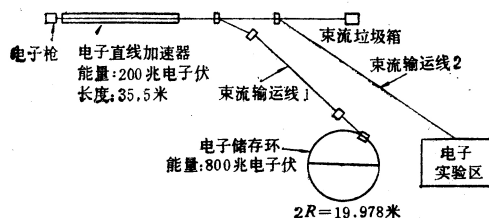


图1 合肥同步辐射装置总体布局示意图。

二、贮存环

图2是800兆电子伏电子贮存环的平面布置图。轨道平面为水平面，周长约63米，由下述几个主要部分组成。

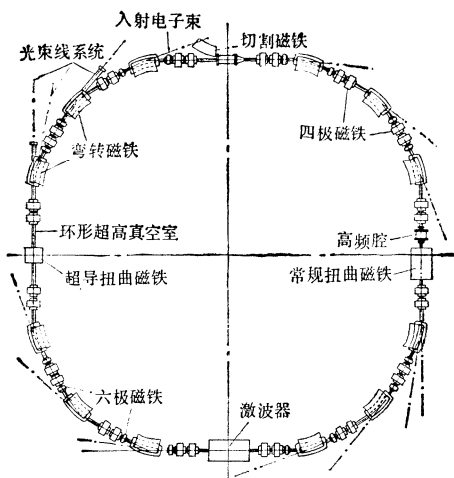


图2 800兆电子伏电子贮存环平面布置图。
 能量：800兆电子伏；弯铁磁场强度12000高斯；弯铁曲率半径2.2222米；周长：62.7626米；特征波长：24埃。

1. 环形超高真空室 选用合金铝材控制，束流孔垂直方向高42毫米，水平方向宽80毫米，束流沿其中心线迴转。为了减少电子与残余气体原子、分子的碰撞损失，保证有10小时以上的束流寿命，使用了20台溅射离子泵和12台分布式离子泵，以维持真空室内 2×10^{-9} 托的超高真空。

2. 磁铁 全环共有12块C型平头平行边弯转磁铁，即每个象限内有3块，每块重量约5吨，工作场强12000高斯。它们的作用是弯转电子，使保持在轨道上，以产生同步辐射。电子在弯转磁铁中走弧线，而在其他部分走直线。在所有弯转磁铁中的平衡轨道合起来正好是一个圆。在弯转磁铁区域真空室壁的外侧开出适当窗口，并接上超高真空管道和光学元件，即形成同步辐射光束线系统，出射的同步光束就用来做实验。来自本装置弯转磁铁的同步辐射的特征波长 λ_c 为24埃，它接近连续同步辐射谱的峰值。光谱强度不低于峰值的1/10的波长范围为可用波长范围 $(0.2\lambda_c - 10^4\lambda_c)$ ，本装置弯转磁铁辐射的可用波长范围为4.8埃— 2.4×10^5 埃。特征波长 λ_c 处的光谱强度 $N_1(\lambda_c)$ 为 3.8×10^{13} 光子/(秒·毫弧度轨道· $\% \Delta\lambda/\lambda$)。

全环共有32块四极磁铁，即每个象限内有八块，每块重量约0.5吨，其作用是聚焦电子束。

全环还有16块六极磁铁，用来校正色品，克服束流的头尾不稳定性。

3. 插入元件 在贮存环的直线节中，电子的平衡轨道是直线，不产生同步辐射。如果在直线节中安放一个特殊的磁铁，使其极性沿束流前进方向交替地变化，则电子平衡轨道将相应地发生扭曲，正好象游动的子一样，因此将产生同步辐射。适当设计这种磁铁，可以

使进入磁铁前和离开磁铁后的电子平衡轨道仍保持同一直线，也就是说，放入这种磁铁并不影响环中其他部分的平衡轨道，而只是在这特殊磁铁处的电子轨道被扭曲了，这种特殊磁铁叫做插入元件，其主要功能是产生同步辐射，而且辐射性能好，引出效率高。

在同步光源中主要有两类插入元件。一类插入元件的磁场强度高于弯转磁铁场强，极数较少，它产生连续的同步辐射谱，但特征波长要比上述特征波长短(起到波长移动器的作用)，同时，由于场强高，且各极辐射是叠加的，故辐射强度也将增加，这类插入元件叫做扭曲磁铁。另一类插入元件的磁场强度远远低于弯转磁铁磁场，但极数很多，而各极辐射相干涉的结果，会产生高亮度的准单色光，这类插入元件称为波荡器。

合肥同步辐射装置上将安装三个插入元件：(1) 超导扭曲磁铁。它作为波长移动器，主要用来产生比弯转磁铁辐射波长更短的X射线，以扩大本装置的应用范围。峰值场强50千高斯，分三个周期(五个整极加两个半极)，每个周期长15厘米。特征波长 λ_c 为5.8埃，最短可用波长为1.16埃，特征波长处的光谱强度 $N_2(\lambda_c)$ 为 2.3×10^{14} 光子/(秒·毫弧度轨道· $\% \Delta\lambda/\lambda$)。

(2) 常规扭曲磁铁。主要用以提高同步光强度。场强不比弯转磁铁高多少，但由于各极辐射叠加而使辐射强度提高。这相当于增加了贮存电子束流强度。这种磁铁为普通电磁铁，峰值场强15千高斯，有四个周期(七个整极加两个半极)，每个周期长33.2厘米。特征波长 λ_c 为19.4埃，最短可用波长3.9埃，特征波长处的光谱强度 $N_2(\lambda_c)$ 为 3.45×10^{14} 光子/(秒·毫弧度轨道· $\% \Delta\lambda/\lambda$)。

(3) 永久磁铁波荡器。主要用以产生高亮度的准单色光，以满足某些实验的特殊需要。选用稀土钴合金永磁材料，磁场峰值3280高斯—520高斯可调，有30个周期，每个周期长6厘米。准单色光谱振波长60—329埃可调，亮度约比弯铁辐射高 10^4 倍。

4. 高频腔电子在贮存环中迴转，因发出同步辐射而损失能量，为使电子始终保持在同一轨道上运动，必须不断给它补充能量，使每转一圈，能量得失相当。高频腔就是给电子补充能量的“加油站”。它是一个双 $\lambda/4$ 的重入式谐振腔，是用无氧铜——不锈钢复合钢板制造，工作频率200兆周，以一台40千瓦的高频机作为功率源。

5. 切割磁铁和冲击磁铁环中还设置一块脉冲切割磁铁和三块冲击磁铁，以把来自直线加速器的电子注入到贮存环。

三、直线加速器

图3是200兆电子伏行波电子直线加速器的布局示意图。它主要由电子枪、预聚束器、聚束器和九个三

米长的加速段组成，全长约 36 米，工作频率 2856 兆周。电子枪为三极枪，有微秒级和毫微秒级两种工作模式，电压 80 千伏，脉冲流强 100 毫安。预聚束器为

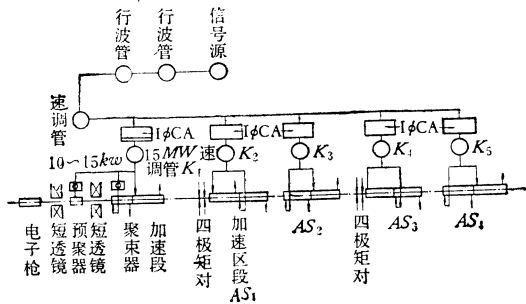


图 3 200 Mev 直线加速器布局示意图。

一个重入式谐振腔。聚束器由四个相速等于 0.75 倍光速的 $2\pi/3$ 模等阻抗盘荷波导腔组成，每个三米长加速段由 87 个相速等于光速的 $2\pi/3$ 模等阻抗盘荷波导腔组成。预聚束器、聚束器和第一个三米长加速段由一支 15 兆瓦速调管供给微波功率，其余八个加速段，每两个组成一个区段，每个区段由一支 15 兆瓦速调管供给。五支速调管由同一激励系统分出功率来激励。

根据计算，直线加速器可望达到的束流性能指标为：能量 244 兆电子伏，脉冲流强 50 毫安，能散度 $\pm 0.8\%$ ，发射度 0.085π 毫米·毫弧度。

四、光束线系统

本装置至少可引出 15 条光束线：12 块弯转磁铁每块可引出一条，三个插入元件每个至少可引出一条。每条光束线还可分为 2—3 个分束，供给 2—3 个实验站。目前已完成五条光束线的初步设计，其中三条是相应于弯转磁铁、常规扭曲磁铁、永磁波荡器的真空紫外光和软 X 射线光束线，供超大规模集成电路光刻、光电子谱、光谱与发光等研究用，另两条是相应于超导扭曲磁铁的 X 射线光束线，供一般 X 射线实验和小角衍射实验用。

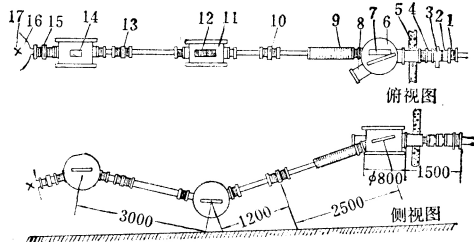


图 4 真空紫外光光束线系统布局图。

1. 光孔、水冷光子罩； 2. 超高真空阀； 3. 快速阀； 4. 安全阀； 5. 混凝土屏蔽墙； 6. 镜箱； 7. 分束镜； 8. 备用分束接口； 9. 声波延迟器； 10. 单色仪入射狭缝； 11. 镜箱； 12. 光栅； 13. 单色仪出射狭缝； 14. 聚焦后置镜； 15. 出射狭缝； 16. 样品室； 17. 实验样品；

一条光束线一般可分为如下五个部分：

1. 前端区它包括：(1) 快速阀和超高真空阀。在切断光束线系统或系统漏气时用以保护贮存环真空。与之配合，在前端区之后还设有声波延迟器，以延缓漏气流传至前端区的速度使快速阀来得及动作。(2) 光孔和水冷光子罩。前者限定光束截面形状，后者在不需要光束通过时阻断光束。(3) 辐射安全阀。它在束流线不工作时关闭，以防止来自贮存环的高能辐射。
2. 分束和聚焦系统用分光镜把从一个窗口来的一束同步光分成 2—3 分束，供给 2—3 个实验站。分光镜也同时起聚焦前置镜的作用。
3. 单色器经过分光镜后的同步光仍为连续谱，使用单色器以选取所需的任何波长的单色光，或转动单色器在一定波长范围内扫描。真空紫外光单色器一般采用光栅，X 射线单色器一般采用晶体。
4. 实验站主要是样品室及其附属设备。同步光在样品室中照射样品进行各种实验。
5. 辅助系统包括真空系统、水冷系统、控制系统、数据采集和处理系统等。

图 4 是我们所设计的真空紫外光光束线中的一条的布局图。

应用范围

图 5 给出了本装置弯转磁铁、超导扭曲磁铁、常规

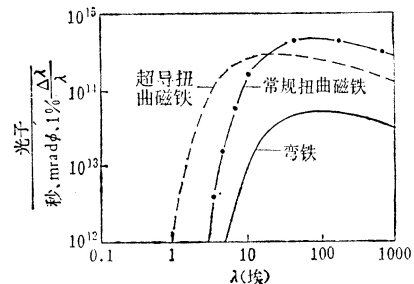


图 5 合肥同步辐射装置几种元件同步辐射光谱强度。

扭曲磁铁中同步辐射的光谱强度曲线。图 6 表示各种研究工作所要求的辐射波长范围。从这二个图可以看到，利用本装置弯转

磁铁的辐射可以开展真空紫外光和软 X 射线范围内的所有研究工作，而利用超导扭曲磁铁的同步辐射则可以开展相当一部分 X 射线范围的研究工作。

一、本装置在真空紫外光和软 X 射线范围内的主要用途

1. 软 X 射线光刻

用软 X 射线进行超大规模集成电路光刻，其方法与普通光刻相同，但所用波长短，最佳波长 10—20 埃，其次是 50 埃左右。本装置在这波长范围内辐射最强。同步辐射软 X 射线光刻线宽仅为普通光刻线宽的 1/10—1/100，故集成度可比目前的大规模集成电路的集成度高 100—10,000 倍，从而可使微电子元件高度

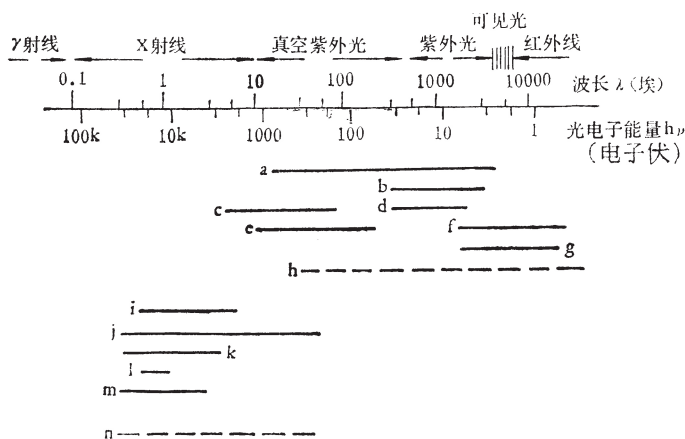


图 6. 各种研究工作所需波长范围.

a 固体物理 (ARPES)(SEXAFS); b 气相光电谱; c 软 X 射线光电谱; d 光化学; e 光刻、显微术; f 生物物理; g 荧光 h 辐射计量; i 小角散射; j X 射线谱 (EXAES, SEXAFS, XPS); k X 射线衍射; l 化学, 结晶学; m 荧光; n 形貌学, 粉末衍射;

微型化, 引起电子工业革命性的变化, 对科学技术和国防建设产生重大影响.

2. 基础科学和应用科学研究

(1) 固体物理和表面物理本装置弯转磁铁同步辐射光子能量从小于 1 电子伏直到 2.6 千电子伏, 这正好覆盖了从深价态到许多中心态的结合能范围, 很有利于研究电子态、固体的能带结构、固体及表面的电子结构, 以了解诸如固体的发光特性, 纯金属、合金、半导体、超导体、绝缘体的特性, 表面上特定元素的配位环境, 表面在催化中的作用, 等等.

(2) 生物学 同步辐射在生物学中的应用主要是在硬 X 射线波段, 但软 X 射线和真空紫外光也有许多用处. 例如, 在细胞生物学研究中, 可用本装置产生的软

X 射线做软 X 射线显微镜, 以直接观察细胞. 在分子生物学中可用真空紫外光研究生物大分子系统中的能量传递, 等等.

(3) 化学 可用于光化学研究、分离同位素 (特别是分离铀同位素)、研究分子化学键、研究大气中不同部分化学反应等.

(4) 在原子物理、分子物理等其他学科中也有许多应用.

3. 辐射计量学

由于缺乏真空紫外光和软 X 射线源, 当前的辐射计量工作主要是在近紫外到红外波段 (3000—10000 埃), 而等离子体物理、天体物理、生物物理、化学、医学、固体物理和技术的发展要求软 X 射线和真空紫外光的辐射计量工作, 本装置的同步辐射是这波段内最好的标准光源.

二、本装置在 X 射线波段内的用途

本装置超导扭曲磁铁所产生的 X 射线可在生命科学、材料科学、化学、地球科学等许多领域里得到应用. X 射线吸收边精细结构分析 (EXAFS)、表面延展 X 射线吸收边精细结构分析 (SEXAFS)、X 射线衍射结构分析 (包括小角衍射、反常散射、粉末衍射和 X 射线形貌)、X 射线荧光微量元素分析等实验均可进行, 但由于所产生的 X 射线波长还不够短, 做好工作还受到些限制. 如, 在吸收边实验中最短可用波长 1.15 埃, 可做到锌、镓元素的 K 吸收边, 钨、铈元素的 L_{23} 吸收边. 其他 X 射线工作将依靠更高能量同步光源来完成.

在我国第一台同步辐射装置即将开始动工兴建之时, 希望各有关领域的研究工作者和生产单位都来关心它, 并充分考虑以后如何来利用它.