

\* 大科学工程\*

# 预研中的上海同步辐射装置

陈森玉\*

(国家上海同步辐射中心 上海 201800)

关键词 同步辐射

由中国科学院和上海市人民政府共同建议建造的上海同步辐射装置(SSRF)将是一台能量居世界第四、性能超过同能区现有的第三代同步辐射光源,并可开展自由电子激光研究进而发展成为第四代光源。它是我国规模最大的一项大型科学工程,将成为下世纪我国多学科前沿研究中心和高新技术产业的开发研究基地,在提高我国科技综合实力方面将发挥重要作用。SSRF 的可行性研究工作已于 1996 年 10 月基本结束,初步完成总体设计报告,并获得由国内外知名专家组成的国际评审委员会的高度评价。1997 年 6 月,国家科技领导小组批准 SSRF 的预制研究。中国科学院院长路甬祥任工程领导小组组长,上海市常务副市长陈良宇、国家科技部副部长惠永正任副组长。目前,SSRF 的加速器装置部分已由物理设计转入技术设计和部件研制,光束线站也已进入技术设计阶段,SSRF 将落址上海浦东张江高科技园区。

## 1 同步辐射光源的特点

### 1.1 性能优异

同步辐射是由以接近光速运动的电子在磁场中作曲线运动改变运动方向时发出的电磁辐射。同步辐射光源是继电光源、X 光源和激光光源之后,第四次为人类文明带来革命性进步的崭新光源,它具有一系列其它人工光源无可比拟的独特而优异的性能:波长范围宽,从远红外到硬 X 射线连续可调;高强度,一台同步辐射光源的总功率是 X 光机的上万倍;高亮度,同步辐射光源的亮度是 X 光机的上亿倍;高准直度,同步辐射发射的光几乎是平行光;优良的脉冲时间结构,其宽度在几十皮秒至几十纳秒之间可调,相邻脉冲间隔为几十纳秒到微秒量级;高偏振、准相干性;高纯净;可精确计算及高稳定性,可以提供十几到几十小时的稳定束流。

### 1.2 应用领域广泛

同步辐射应用的领域之广泛,涉及的学科之多,是其它大科学装置无法比拟的,它是许多前沿学科领域研究的一种最先进又不可替代的工具。传统上,材料科学家是同步辐射最大的用户之一,约占 1/3。在材料科学中,利用同步辐射的相关技术研究材料的结构、性能及机理的关系,对实现晶体生长的控制和半导体材料“能带工程”的研究以及新型磁性材料的发展等正发

\* 国家上海同步辐射中心(筹)主任、研究员,上海同步辐射装置工程指挥部总经理

收稿日期:1999 年 9 月 29 日

挥越来越大的作用。世界上运转的同步辐射光源约有 1/3 的时间用于生命科学的研究。研究组织、细胞、蛋白和基因的结构和组份与功能的关系是其核心所在, 尤其是用于对生物大分子晶体结构的研究。1994 年以来, 在 *Nature*、*Science* 和 *Cell* 等世界一流期刊上发表的新的生物大分子晶体结构研究成果, 有 60% 以上是利用同步辐射装置得到的, 这个趋势还将进一步增强。在分子环境科学中, 基于同步辐射的谱学技术已被证明是不可替代的最有力工具, 用于在分子尺度上描述环境污染物的形态以及主导污染物迁徙、摄取和释放过程。在凝聚态物理中, 同步辐射在微区、动态、瞬变、原位和极端条件下的结构组份与动力学过程等方面的研究所起的作用是不可替代的。在表面介面科学、原子和分子及团簇物理、化学、地学和能源科学中, 同步辐射是这些学科不可缺少的重要实验研究工具, 为其新的发展提供了机会。

### 1.3 具有直接应用价值

同步辐射装置不同于其它的大科学装置, 它除了可支持基础研究和应用研究外, 对科技进步、产业发展、生产力提高还起直接的促进作用。例如, 随着集成电路的集成度越来越高, 科学界估计, 对线度在 0.1 微米以下的集成电路, 同步辐射光刻将成为主要的光刻手段。除了已运行的专用线站外, 目前世界上已有 5 个专用的光刻光源(超导储存环)。微电子机械系统(MEMS)是一种高度智能化、高度集成的系统。科学家预言, 20 年后 MEMS 形成的社会和经济效益规模, 将相当于今天的微电子技术所产生的效益。在微细加工技术中, 利用同步辐射 X 光深度光刻及微电铸和微塑铸等工艺组成的 LIGA 技术, 已经研制出微型传感器、光电部件、马达、齿轮、电子开关和喷嘴等。同步辐射不仅在 MEMS 制造技术方面发挥重要作用, 而且在 MEMS 器件大规模生产中将起到不可估量的作用。在医疗诊断和医药学中, 同步辐射被应用于心脑血管造影, 现正逐步进入实用阶段。同步辐射还为新药的设计、研制、筛选和开发提供有力的分析和研究手段。美国多家医药公司竞相在 APS 光源上建造各自专用的同步辐射光束线、实验站, 以期在 10—15 年内研究并破解所有致病分子的 DNA 结构, 设计生产出新药, 提高人类寿命。在石油工业中, 同步辐射用于研究催化剂催化机理、催化反应动态过程, 其研究结果直接影响到石油化学工业的效率和产出。

## 2 国外发展现状和趋势

自 1947 年首次观察到同步辐射以来, 同步辐射装置的发展已历经三代。第一代同步辐射光源为兼用机, 是利用一些为高能物理实验建造的电子储存环所产生的同步辐射光兼作其它学科的研究。第一代光源的束团发射度较大, 约为几百  $\text{nm} \cdot \text{rad}$ , 相应的光谱亮度较低, 约  $10^{13}$ — $10^{14}$  (光谱亮度单位为:  $\text{Photons/s} \cdot \text{mm}^2, \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{ BW}$ , 下同)。70 年代中期开始建造一批专为同步辐射应用而设计的第二代同步辐射光源(或称专用机), 束团发射度降低到 50—150  $\text{nm} \cdot \text{rad}$ , 相应的光谱亮度也提高了两个数量级即  $10^{15}$ — $10^{16}$ 。80 年代末到 90 年代初, 世界各国竞相建造第三代同步辐射光源, 束团发射度可压缩到 5—12  $\text{nm} \cdot \text{rad}$ , 更重要的是在该类机器上可安装大量的插入件, 即波荡器和扭摆器, 大大提高了光谱的亮度, 达  $10^{17}$ — $10^{19}$ 。高亮度的第三代同步辐射光源使得同步辐射的应用发生了质的飞跃, 从过去静态的、在较大范围内平均的手段, 扩展为动态、空间分辨的和时间分辨的手段, 得以开展微区、动态、瞬变、原位和极端条件下结构组份与动力学性质等的实验研究, 为众多的学科和技术应用领域带来前所未有的新机遇。目前世界上已建成的第一代同步辐射光源有 17 台, 第二代有 23 台, 第三代有 9 台, 正在建造和设计的第三代光源有 12 台。预计到 21 世纪初, 大约将有 20 多台第三代同步

辐射光源投入运行。

由于同步辐射装置可以同时进行基础科学研究、应用基础研究和工业应用,使得该装置的建设在许多国家得到优先支持,并已被提到战略的高度。发达国家如美国、日本、德国、英国和法国等,均已有第二代同步辐射光源,但仍然建成了 ALS(美国)、APS(美国)、SPRING-8(日本)、BESSY II(德国)、ESRF(欧洲联合建造在法国)等第三代同步辐射光源。欧洲虽已联合建成了一台高能量(6GeV)的第三代同步辐射光源 ESRF,但有关国家仍各自建造了 ELETTRA(意大利)、MAX II(瑞典)、BESSY II(德国)和建造 DIAMOND(英国)、SOLEIL(法国)、SLS(瑞士)、LSB(西班牙)、CLS(加拿大)等第三代光源。日本仍要建造 SRL(东京大学)、NHSR(Nanohana)、SOR、HISOR 等四台第三代同步辐射光源。美国也要将 SPEAR3 升级改建为第三代光源。一些发展中国家和地区,如韩国、台湾,已分别建成 PLS 和 SRRC,印度、巴西正在建造 INDUS-2 和 LNLS-2 等第三代光源,更多的国家特别是新兴国家也表示了建造的兴趣,如泰国、新加坡等。如果我国在“九五”到“十五”期间在同步辐射方面没有大的发展,就将落后于国际的步伐,处于被动的地位。

### 3 我国建设高性能同步辐射装置的必要性

随着同步辐射研究和应用的深入与扩展,众多前沿学科和广泛的技术应用对同步辐射光源提出更高的要求。近年来,国际上 X 射线及硬 X 射线能区的用户急剧增加,特别是结构分子生物学和分子环境科学以及材料科学和地质科学的应用研究蓬勃发展,都对第三代光源的亮度和 X 光的波长范围提出了新的要求。美国及欧洲对未来用户的调查表明,材料科学用户占 30%,结构生物学占 28%,分子环境科学占 23%;而要求提供光子能量在 4—30keV 的用户占 57%,光子能量为 0.1—4keV 的用户占 19%,光子能量小于 0.1keV 的用户占 17%,光子能量大于 30keV 的用户占 7%。因此,各国已建造或正在设计的中能第三代光源都尽可能将其能量提高,以尽可能扩展其提供的 X 射线及硬 X 射线的波长范围。据调查,我国用户也是在 4—40keV 的 X 及硬 X 射线能区的居多,其次是 0.1—4keV 的软 X 射线用户,而我国大陆现有的两台同步辐射装置的性能及应用范围有较大的局限性。

北京同步辐射装置 BSRF(与粒子物理兼容,专用时能量为 2.2GeV,属于第一代)是北京正负电子对撞机 BEPC 的附属部分,在当前 BEPC 以粒子物理研究为重点的前提下,每年只能有 20% 左右的时间提供给同步辐射专用,专用模式时的电子束流约为 100mA,光谱亮度为  $10^{13}$  左右,比第三代光源低 5 个数量级,更大的限制是它无法安装高性能的专用插入件。另外, BEPC 工作在对撞模式时,虽可提供兼用的同步辐射光,但由于对撞模式对电子束的要求与同步专用模式相矛盾,因而进一步降低了兼用模式时的同步辐射光的性能。

合肥同步辐射光源 NSRL 是低能量(0.8GeV)的第二代真空紫外和软 X 射线光源,二期工程结束后,其插入件的亮度虽可达  $10^{16}$ ,但光子能量  $< 0.4\text{keV}$ 。虽然其超导扭摆器引出的光子能量可达 1—10keV,但由于亮度仅约  $10^{13}$ ,也比第三代光源低 6 个数量级左右。总之,由于其亮度特别是波长范围受到较大的限制,将使要求波长在 X 射线及硬 X 射线范围内的生命科学、材料科学、信息科学和环境科学等 21 世纪的前沿学科领域的用户,不能用它开展工作。

迄今为止,上述两台装置已为全国 60 余个科研单位及大学的百余个研究课题提供了上万小时的机时,并取得了不少优秀的成果,但是离我国用户的要求还有很大的距离,它们在光亮度、X 波段范围、光的稳定性、空间和时间分辨率等方面仍不能满足我国科学发展的需要。由此



可见, 建立一台新的、大能量、高性能的 SSRF 是完全必要的, 也是适合我国国情的。只有这样, 才能把我国在这一领域中的研究工作推向前列。

#### 4 SSRF 建成后的水平和意义

SSRF 由 300MeV 电子直线加速器、3.5GeV 增强器和 3.5GeV 的储存环及同步辐射实验线站组成。能量 3.5GeV, 仅次于日本的 Spring-8、美国的 APS 和欧洲的 ESRF, 居世界第四; 平均流强 200—300mA, 束团自然发射度  $\sim 10\text{nm} \cdot \text{rad}$ , 束流寿命  $> 20\text{hrs}$ , 引出光斑位置稳定性  $\sim \pm 10\mu\text{m}$ , 性能超过同能区现有的第三代同步辐射光源; 利用其 300MeV 电子直线加速器开展深紫外自由电子激光应用研究, 将发展成为由射频电子加速器驱动的短波自由电子激光装置, 使我国直接步入第四代光源研制和应用的世界前列。

同步辐射光源的尖端性和综合性, 使其具有很高的现代科技融合性和集成性, 对于国家的总体科技发展有很强的先导性和基础性。因此, 同步辐射光源及其应用水平已成为显示一个国家科技发展水平和综合国力的标志, 也是展示一个国家知识创新能力的窗口。SSRF 的建设符合我国下世纪初在若干前沿学科领域和高技术产业赶上并超过世界先进水平的总体目标, SSRF 建成和投入使用后, 必定会带动和影响许多学科的知识创新及高新技术的发展。

##### 4.1 将成为多学科前沿研究中心和高技术产业的开发研究基地

SSRF 建成后, 将有力地支持我国材料科学、生命科学、环境科学、信息科学、表面界面科学、凝聚态物理、原子分子物理、团簇物理、化学、医药学、地质学等学科的基础研究, 支持电子工业、医药工业、石油工业、化学工业、生物工程、医疗诊断及微细加工工业等技术的开发应用研究, 从而在提高我国科技综合实力方面发挥重要作用, 它将成为我国标志性的大科学装置。

##### 4.2 为多学科之间的相互渗透、交叉和融合创造条件

学科之间的渗透、交叉和融合已经成为现代科学技术发展的一个主要特征, 其范围已经从小学科之间、相邻学科之间发展到大学科之间和远离学科之间。SSRF 正是这样一个遵循科学规律、顺应历史发展趋势的大科学研究中心。SSRF 建成后, 可容纳上千名来自不同部门和单位、从事不同学科和领域的研究、为实现完全不同目的的科学家和工程师, 同时开展工作。在这样的优良环境中, 使用 SSRF 的科学家和工程师之间相互交流、启发和影响, 最有利于实现学科之间的相互渗透、相互交叉和融合, 从而萌发新思想, 产生新方法, 开辟新领域, 建立新学科, 以至有可能引发一场科学进步的飞跃。

##### 4.3 带动我国相关工业和产业的发展

SSRF 集若干先进技术成果于一身, 它的如期建成将体现我国的综合科学技术水平和工业制造能力。通过 SSRF 的建设, 将直接带动我国现代高性能加速器、超导磁铁技术、超高真空技术、高精密机械加工、X 射线光学、快电子学、束流的监测反馈和自动控制技术以及高稳定建筑等先进技术和产业的发展。再者, 根据国际上同步辐射应用研究的现况和发展推测, SSRF 将在我国的电子工业、医药工业、石油工业、化学工业、生物工程和微细加工等产业的发展中得到广泛的应用, 并推动这些产业的发展和提高。美国最近建成的同步辐射光源 APS 中有 15 条光束线及相应的实验站是由 IBM、EXON 石油公司和医药工业等工业界投资建成的; 日本国千叶县由财团集资正在筹建一台第三代同步辐射光源, 用于产业性开发研究。由此可见, 不仅学术界, 而且工业界也认识到同步辐射装置对下世纪生产力发展的重要作用。