

中国光源及其科学目标¹⁾

姜晓明 梁岫如

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 1993年11月,丁大钊、方守贤、洗鼎昌三位院士提出“关于在我国建设第三代同步辐射光源的建议”,并称之为“中国光源(Chinese Light Source, CLS)”。一年多来,中国科学院高能物理研究所按照这个建议的思想,吸收有关单位参加,在光源物理设计、加速器关键技术、高功率同步光的传输和高性能实验技术等方面开展了大量的调研工作。本文简要介绍中国光源及其科学目标。

关键词 同步辐射,中国光源,科学目标

Abstract The proposal to construct a third-generation synchrotron radiation source in China, named as the Chinese Light Source, was put forward by Ding Dazhao, Fang Shouxian, and Xian Dingchang at the end of 1993. Since then scientists in the Beijing Electron-Positron Collider National Laboratory have carried out wide investigations on the design of the light source, key techniques of accelerator construction, transmission of high power synchrotron radiation, and high performance experimental methods. The main specifications of the Chinese Light Source and its scientific programs are briefly discussed.

Key words synchrotron radiation, Chinese Light Source, scientific program

1 建设第三代光源的重要性和必要性

同步辐射光源自70年代投入应用以来,在许多学科的基础研究和新技术应用方面起到了革命性的推动作用,显示出具有其他光源不可替代的优异性能,带动和影响许多学科和高新技术的发展,成为当代科学实验和新技术研究的强有力工具。

世界上现有同步辐射光源50余台,其中第一代光源17台,第二代专用光源23台。80年代末以来,已建成4台第三代光源(美国、法国、意大利和中国台湾各1台);正在建造和设计中的有17台(其中韩国、印度、巴西各一台)。

目前有几万名科学家和工程师利用世界上正在运行的同步辐射光源进行前沿学科研究和新技术开发研究,所涉及的学科有生命科学、材料科学、化学、凝聚态物理、分子和原子物理、地

矿学、能源科学、医药学等,以及微电子技术、生物工程、化工工业、医药工业等方面的工业应用研究。

作为一个多学科交融的实验基地,一台高性能的同步辐射光源,可容纳几十条光束线和实验站,可供不同学科的几十个用户同时使用,不但利于学科间的交流和促进,而且可产生辐射效应,形成新的科学和技术的生长点。

中国现有三台同步辐射装置,即北京同步辐射装置(BSRF)、安徽合肥国家同步辐射实验室(NSRL)和台湾新竹同步辐射研究中心(SRRC)。BSRF和NSRL的建设成功和运行,为我国广大用户提供了基本的实验条件,已经取得了一些很好的成绩,研究工作的范围和领域正在不断扩大。但BSRF是与高能物理实验兼用的第一代同步辐射光源,NSRL的储

1) 1995年6月16日收到。

存环电子能量为 0.8GeV,可应用同步光的能区受到限制。如果在九五时期同步辐射方面没有大的发展,现有的同步辐射实验条件将与 21 世纪初学科发展的需要有较大差距。

2 中国光源的主要设计参数

中国光源储存环的主要设计参数如表 1 所示,设计方案的特点为:高性能、中规模和全波段。

表 1 CLS 基本参数

储存环电子能量	2.0—2.5GeV
储存环周长	190—250m
储存环电子束流	300mA
电子束发射度	$\leq 5\text{nm}\cdot\text{rad}(2.0\text{GeV})$
临界能量	
普通 B 铁	2.7keV(2.0GeV)
超导 B 铁(5T)	13.5keV(2.0GeV)
8 个直线节	7m × 4, 8m × 2, 15m × 2

高性能:光源的主要性能指标先进,如耀度、能谱范围以及提供安放插入元件的空间等,在建成时仍属国际先进水平,可满足国内外日益增长的多学科用户的需求。

中规模:在第三代同步辐射光源的三个典型储存环电子能量区段中,选择 2.0—2.5GeV 的能区,储存环周长在 190—250m 范围,高效而紧凑。

全波段:采用常规和超导磁铁混用的方式,产生的同步光覆盖软 X 射线和硬 X 射线波段。其中从超导磁铁获得的同步光谱相当于 5GeV 左右大规模光源的光谱。

另外,提供两个长 15m 的超长直线节,可供发展同步辐射第四代光源(自由电子激光装置)研究和其他特殊用途。

CLS 同步辐射的光谱耀度(光子/s·mm²·mrad²·0.1% 带宽)可以分别达到 10¹⁵(弯转磁铁)、10¹⁶—10¹⁷(多极扭摆器)和 10¹⁸—10¹⁹(波荡器),其同步光能谱如图 1 所示。作为比较,北京同步辐射装置(BSRF)、安徽合肥国家同步辐射实验室(NSRL)和台湾新竹同步辐

射研究中心(SRRC)的同步光谱曲线也绘于图 1 中。

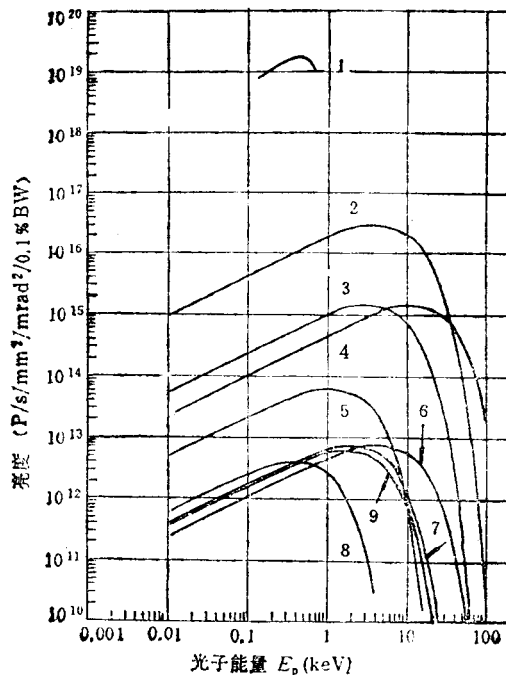


图 1 中国光源的同步辐射耀度谱

1.波荡器; 2.扭摆器; 3.常规弯铁; 4.超导弯铁 [作为比较,图中还给出了台湾新竹同步辐射研究中心(5)、北京同步辐射装置(6.扭摆器,7.弯铁)和合肥国家同步辐射实验室(8.弯铁,9.计划建造的超导弯铁)的同步辐射谱]

3 光束线与实验站建设方案

光束线与实验站的建设原则是:

(1) 立足于现有基础:把“七五”期间建设的实验方法提高到新水平;

(2) 着眼于学科发展的需要:新建光束线和实验站将对下世纪初的学科发展提供全新的实验分析手段;

(3) 结合国内的实际情况:对有特色的研究方面如稀土材料的应用和 LIGA 技术等方面给予特别的考虑。

表 2 中列出了 CLS 拟建造的第一批实验站及其应用研究领域,所建成的光束线和实验站将具有 90 年代末同步辐射应用研究的国际水平。

表 2 建议在中国光源上第一批建造的实验站及其应用研究领域

	部件	实验站	应用学科	研究内容
硬 X 射线波段	超导弯铁	白光劳厄照相术	生命科学	蛋白质晶体学及其动态研究
		极端条件衍射	材料科学、地球科学、凝聚态物理	极端条件下物质结构研究
	光子能量 ≤60keV 光谱亮度* ~10 ¹⁵	核共振散射	凝聚态物理,材料科学	穆斯堡尔谱学、高分辨 X 射线学
		微探针荧光分析	材料科学、生命科学、地球科学、医学、石油化工	痕量元素分析、元素 CT、矿产资源分析
		漫散射和表面衍射	材料科学、凝聚态物理	晶体缺陷和表面界面结构研究
		反常散射、衍射和小角散射站	凝聚态物理、化学、材料科学、生命科学	固体和大分子晶体结构测定,高聚物、大分子 X 射线小角散射
		自旋极化光电电子能谱站	凝聚态物理、材料科学、表面界面科学	磁性材料结构和性能分析
		医学实验站	医学诊断	心血管造影术、断层扫描分析
		表面 EXAFS,驻波	材料科学、凝聚态物理	表面、界面成分和结构研究
		磁散射	材料科学、凝聚态物理	磁 X 射线散射、磁性材料磁结构
X 射线波段	扭摆器 ≤25keV ~10 ¹⁶⁻¹⁷	高分辨形貌学和多晶轴衍射	材料科学、凝聚态物理	晶体缺陷和结构相变实时研究
		X 射线吸收谱	凝聚态物理、化学、材料科学	常规 XAFS 方法研究
	常规弯铁 ≤25keV ~10 ¹⁵	光刻术, LIGA	微电子学、微机械加工	亚微米光刻、深度光刻
		磁圆二色谱仪	生物光谱学、材料科学	生物分子结构、磁性材料开发
		软 X 射线分析系统	软 X 射线学	软 X 射线元件检测、研制、开发
		轻元素 XAFS	凝聚态物理、化学、材料科学	轻元素 XAFS 谱研究
		电子束研究	加速器物理	储存环性能研究
线软 X 波段射	波荡器 ≤2keV 2 × 10 ¹⁹⁻²⁰	时间分辨光谱学	凝聚态物理、化学、材料科学	原子分子物理、团簇谱学
		软 X 射线显微术 谱学显微术	生命科学、凝聚态物理、化学、材料科学	生物细胞三维成像、软 X 射线全息、微区化学分析

* 光谱亮度单位: 光子数/(s · mm² · mrad² · 0.1%BW)

CLS 的高亮度将使实验技术在如下 9 个方面有所突破:

(1) 微探针及元素 CT 术: 可达到 1μm 的空间分辨率;

(2) X 射线显微术: 其分辨率将达到 10 mm 量级, 高亮度还可实现在极短时间内观察活生物体的显微图像;

(3) 白光 Laue 术: 将实现从毫秒到纳秒的时间分辨结构观测;

(4) 谱学显微术: 实现平面内 0.1μm 量级的表面化学分析;

(5) 表面 XAFS: 研究材料表面双原子分子取向及其在表面上的结合状态;

(6) 时间分辨谱仪: 研究纳秒间隔的光化学过程;

(7) 反常散射术: 高亮度及多波长的应用为微米级小晶体的结构分析提供有力手段;

(8) 超高分辨率 X 射线学: 波长分辨率在 10⁻¹⁰ 以下的光学还是待开发的未知领域;

(9) LIGA 技术: 是制造毫、微米级的机、电、控一体的微型装置的一个有效途径。

4 科学目标和意义

CLS 的主要科学目标是适应 21 世纪初我国在广泛的科学研究和产业开发领域对极高亮

度和短波长可调光源的需要。从国际发展趋势和国内用户的要求,可以预见,新光源将在以下方面具有开拓性的应用前景:

4.1 生命科学

X射线晶体衍射技术是研究生物大分子结构的最重要的手段。在同步辐射的强光源下,几秒钟内即可完成对生物细胞动态过程的无损观测。

用X射线微探针荧光方法,可直接观察到隔膜装配和拆卸过程;在无污染情况下确定细胞中微量元素的含量和位置;研究微量元素在细胞破损以及各种疾病中的作用;进行生物体的机理研究,如酶反应、分子识别、药物的定向性等。

采用极强同步辐射的X射线显微术,可观察活细胞内的动态结构和各细胞器的结构随功能的变化,如细胞内染色体的图象等等;同步辐射X射线血管造影术用于临床,可很快得到血管阻塞的照片,极大地改善现有诊断方法。

人类基因组的最终破译、蛋白质的改造和设计新分子系列等是世界性课题,可望在21世纪有重大突破,我国必须及早建立自己的实验基地。

4.2 材料科学和凝聚态物理

凝聚态物理是材料科学的基础,发展新材料的基本问题是研究材料的结构及性能之间的关系。

X射线显微术、谱学显微术、光电子能谱分析等实验手段应用于分析材料表面原子排列、电子结构及内部微观结构,在微电子学、高温超导体及二维系统能带结构以及铁磁材料的畴结构等方面起重要作用,在半导体材料和工艺研究、新材料研制等方面有实际意义。

高温、高压极端条件下物质的状态和相变动力学过程的研究以及新型材料的合成,急需高耀度的同步辐射光源。

4.3 信息科学和微电子技术

信息科学的主要任务是数据(信息)的存储、处理和传输。

极高存储密度的新材料如磁光介质材料,

需要用同步辐射自旋分辨光电子能谱方法及磁圆二色等方法,测定价电子自旋的取向,研究材料的磁性;动态存储芯片的存储单元密度继续增加的关键步骤之一就是发展X射线光刻术;国内正在利用已有条件进行深亚微米光刻的工艺研究和简单器件的研制,目标是向实用化发展,制成可用于毫米波制导的高灵敏度器件。

4.4 地球和能源科学

同步辐射的许多方法都是地质、矿物、石油等方面研究的有效手段。

研究矿物颗粒内主要元素和微量、痕量元素的分布价态及相关性,对了解成矿过程中的物理化学条件,研究成矿原因和规律具有决定性的意义。只有在极高亮度和硬X射线的第三代同步光源上才能完成对微米级矿物颗粒或包裹体的成分和结构分析。

稀土元素地球化学的研究为地质变迁、岩矿成因的研究提供重要信息。另一方面,我国是稀土元素富有的国家,这方面的研究还将有力推动我国稀土工业应用的发展。能量为33—63keV并具有高的耀度和分辨率的硬X射线,是进行稀土元素荧光分析的最佳光源。

4.5 有工业开发前景的应用技术研究

第三代同步辐射光源不仅应用于基础研究,在工业技术开发上也能起到重要的作用。比如,集光机电于一身的微机械装置是具有巨大应用前景的新型工业,将对下世纪的人类社会产生巨大影响,应用SR光源的LIGA技术是一种主要的加工手段。国外正在将微传感器、光电微连接器、微机械、微电子开关、微光学部件等推向商业化。

“中国光源”着眼于21世纪,在硬X射线和软X射线方面的优势具有当时的国际水平,可有20—30年的科学寿命,将使我国的同步辐射应用进入一个新阶段。

参 考 文 献

- [1] 丁大钊、姜晓明,中国科学院院刊, No. 10 (1995), 37.