

# 上海同步辐射光源\*

中国科学院上海应用物理研究所 中国科学院基础科学局

(上海 201800)

(北京 100864)

关键词 大科学工程, 中国, 上海同步辐射光源

上海同步辐射光源(简称“上海光源”;英文全名为 Shanghai Synchrotron Radiation Facility, 缩写为 SSRF)是一台高性能的中能第三代同步辐射光源, 它是我国迄今为止最大的大科学装置, 在科学界和工业界有着广泛的应用价值。它具有建设 60 余条光束线的能力, 可以同时向上百个实验站提供从红外光到硬 X 射线的各种同步辐射光, 具有波长范围宽、高强度、高亮度、高准直性、高偏振与准相干性、可准确计算、高稳定性等一系列优异的特性, 可用以从事生命科学、材料科学、环境科学、信息科学、凝聚态物理、原子分子物理、团簇物理、化学、医学、药学、地质学等多学科的前沿基础研究, 以及微电子、医药、石油、化工、生物工程、医疗诊断和微加工等高新技术开发应用的实验研究, 将成为我国多学科前沿研究和高新技术开发应用的重要科技平台。

## 1 同步辐射与同步辐射光源

同步辐射是超高真空环境中以接近光速运动的电子在运动方向改变时产生的电磁辐射, 其本质与我们日常接触的可见光和 X 光一样, 都是电磁辐射。1947 年这种辐射在同步加速器上被发现, 因而被命名为同步

辐射(Synchrotron radiation)。人们发现, 同步辐射具有常规光源不可比拟的优良性能, 从上世纪 70 年代开始, 发达国家逐步开展了同步辐射的应用研究。

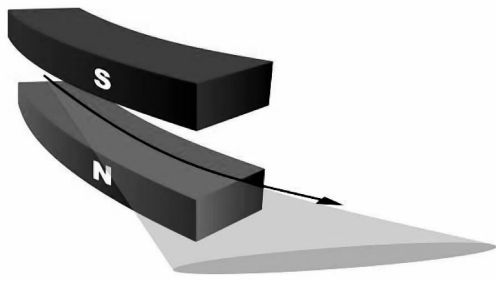


图 1 同步辐射光的基本原理

同步辐射光源已经历了 3 代的快速发展, 第三代同步辐射光源是基于性能更高的同步辐射专用储存环的光源, 它广泛地使用扭摆器、波荡器等插入件, 具有更小的电子束斑尺寸或电子发射度。目前, 世界上已建成的第三代同步辐射光源超过 20 台(包括我国台湾及韩国各 1 台), 正在设计和建造的第三代同步辐射光源约 10 台。

## 2 上海光源概况

上海光源是世界上同能区已建成或正在建造中的性能指标最先进的第三代同步

\* 本文由中国科学院上海应用物理研究所办公室主任贺战军(E-mail:suoban01@sinap.ac.cn), 基础科学局彭子龙共同组织撰写

收稿日期: 2009 年 6 月 3 日

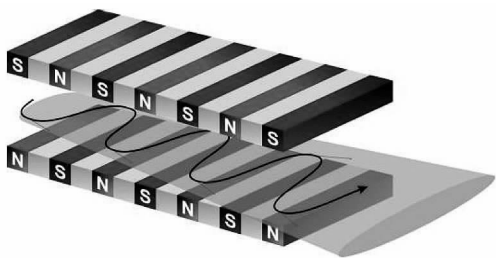


图2 扭摆器发光

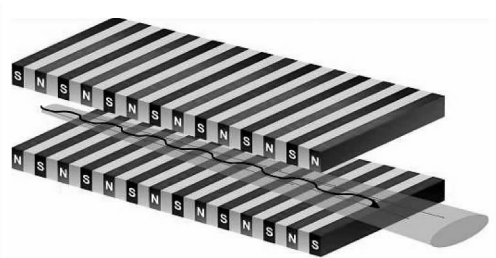


图3 波荡器发光

辐射光源之一。上海光源主体包括1台能量为150MeV的电子直线加速器,1台周长为180m、能量为3.5GeV的增强器,1台周长为432m、能量为3.5GeV的电子储存环,若干光束线和实验站。

海市市长韩正任副组长的工程领导小组,和由中科院副院长江绵恒任总指挥、上海市副市长杨雄任副总指挥的工程指挥部。在工程领导小组和工程指挥部的直接领导下,工程经理部具体实施上海光源工程的建设。经过

表1 上海光源加速器主要性能指标

直线加速器	能量150MeV;
	单束团模式1ns,1nC,多束团模式200ns,3nC;
	中心能量稳定性0.5%;能散度0.5%
增强器	注入能量150MeV;引出能量3.5GeV;
	自然发射度<105nm·rad;重复频率2Hz;
	单束团流强>1mA,多束团流强>5mA;能散<1×10 <sup>-3</sup>
储存环	电子束能量3.5GeV;流强200-300mA;
	最小自然发射度4nm·rad;能散度1×10 <sup>-3</sup> ;
	垂直方向轨道稳定度1微米;束流寿命10小时

上海光源工程是由中科院与上海市政府共同向国家申请建造的国家重大科学工程,由中科院上海应用物理所承建(项目法人单位)。建设内容包括直线加速器、增强器、储存环、首批建设的7条光束线和实验站、公用设施以及主体建筑和辅助建筑。坐落在上海浦东张江高科技园区,占地面积约20万m<sup>2</sup>。

上海光源工程经国家批准,于2004年12月25日正式破土动工,建设周期52个月。中科院和上海市政府积极组织、认真实施,成立了由中科院院长路甬祥任组长、上

4年多的紧张建设,至2009年4月全面、优质、按时地完成了建设任务。经国内专家测试和国际专家评议,上海光源建设质量达到世界一流水平,现在开始向用户开放。

上海光源建设进展情况:2004年12月25日,上海光源国家重大科学工程正式开工;2006年4月28日,主体建筑钢结构吊装合拢;2006年10月15日,35kV电站受电,开始试运行;2007年5月15日,直线加速器调束成功;2007年10月5日,增强器调束实现3.5GeV电子束升能;2007年12月24日,储存环调束成功实现电子束储存和出光;2008年5月12日,第一条光束线站——X射线小角散射线站首轮调试成功;储存环达到能量3.5GeV、流强≥200mA、寿命≥10h的设计指标;首批最后一条光束线站——生物大分子晶体学光束线站首轮调试成功;2009年4月29日,上海光源国家重大科学工程竣工。

表 2 上海光源首批光束线站主要性能指标

生物大分子	能量范围 5—18keV; 能量分辨(@12keV) $\leq 2 \times 10^{-4}$ ;
晶体学线站 (BL17U1)	光子通量 (@12keV) $> 2 \times 10^{12}$ phs/s (@200mA); 光斑尺寸( $H \times V$ ) $\leq 150 \times 50 \mu m^2$ @12keV; 发散角( $H \times V$ ) $\leq 0.4 \times 0.1 mrad^2$
衍射线站 (BL14B1)	能量范围 4—22 keV; 能量分辨率 $\Delta E/E \leq 2 \times 10^{-4}$ @10keV; 光子通量 $\geq 2 \times 10^{11}$ phs/s@10keV@ 200mA; 聚焦光斑 $\leq 0.4H \times 0.4V mm^2$
XAFS 线站 (BL14W1)	能量范围 4—22.5 keV; 能量分辨(@10keV) $\leq 2 \times 10^{-4}$ ; Si(111)晶体样品处光通量(@10keV) $\geq 2 \times 10^{12}$ phs/s (200mA); 聚焦光斑尺寸( $H \times V$ ) $\leq 0.5 \times 0.5 mm^2$
硬 X 射线微聚焦线站 (BL15U1)	能量范围 5—20keV; 能量分辨(@10keV) $\leq 2 \times 10^{-4}$ ; 最小光斑尺寸 $\leq 3mm$ (FWHM); 光子通量(@10keV) $\geq 6 \times 10^{10}$ photons/s (200mA)
X 射线成像及生 物医学应用线站 (BL13W1)	能量范围 10—60keV; 能量分辨 $\leq 5 \times 10^{-3}$ ; 光子通量 $\geq 1 \times 10^9$ phs/s/mm <sup>2</sup> (@20keV@200mA); 光斑尺寸 $\leq 45mm(H) \times 5mm(V)$ @30mA@20keV
软 X 射线 谱学显微线站 (BL08U1)	光子能量范围 250—2 000eV; 分辨能力 3000 @410eV, 1 500 @1 840eV; 空间分辨 $\leq 150 nm$ ; 光子通量 $\geq 10^8$ (phs/s)@410eV, $\geq 10^7$ (phs/s) @1 840eV
X 射线小角 散射线站 (BL16B1)	能量范围 5—20keV; 能量分辨率 $\leq 6.0 \times 10^{-4}$ @10keV; 光子通量 $\geq 3 \times 10^{11}$ @10keV@200mA; 光斑尺寸: $0.4 \times 0.5 mm^2$ @10keV

### 3 上海光源的应用前景

同步辐射为众多前沿学科领域的研究提供了一种最先进又不可替代的工具。利用同步辐射实验技术能够开展众多学科的实验研究,应用领域十分广泛。

生命科学和医药学是利用同步辐射光进行广泛应用的重要领域。同步辐射 X 射线衍射方法是当前测定生物大分子结构的最有力手段,是研究生命现象与生物过程的利器。英国科学家 J. Walker、美国科学家 R. Mackinnon 和 R. Kornberg 借助同步辐射研究生物分子的结构与功能,取得了突破性的成就,先后荣获 1997 年度、2003 年度和

2006 年度诺贝尔化学奖。在 2003 年我国出现 SARS 疫情后不久,我国科学家就利用同步辐射光成功测定了 SARS 病毒主蛋白酶的结构,为研制抵御 SARS 病毒的药物提供了重要信息。在肿瘤诊断方面,利用同步辐射光的高分辨特点,可以发现很小的肿瘤,实现肿瘤的早期诊断以提高治愈率。

材料科学是同步辐射光应用的又一重要领域。利用上海光源所产生的高亮度同步辐射光束,可以揭示材料中原子的精确构造和得到有价值的电磁结构参数等信息,它们既是理解材料性能的“钥匙”,也隐含着发明新材料的原理来源。

在环境资源领域,以同步辐射 X 射线



中国科学院

表 3 同步辐射实验方法和应用领域

相关实验技术 应用领域	X射线衍射/散射	光子非弹性散射、磁散射	EXAFS, XANES	X射线荧光分析	X射线反射漫散射	光谱显微术	光发射谱学	光电子谱学	光电子衍射	光电子显微	光电子谱学	圆二色、磁圆二色	穆斯堡尔谱学	小角X射线散射	X射线吸收成像	X射线衍射相干成像	X射线驻波术	显微X射线CT	X射线形貌术	X射线干涉术	光激励分解	软X射线显微术	全息成像	超快时间分辨术	X射线光刻	光子吸收治疗	微细加工
凝聚态物理	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●				●	●		●	●			
材料科学	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●		
原子物理	●	●	●	●			●	●				●	●							●				●			
分子物理		●	●	●			●	●				●	●	●						●				●			
化学	●	●	●	●	●	●		●	●			●	●	●			●				●		●	●			
光化学	●		●	●	●		●	●				●		●						●				●			
核物理													●														
结构生物学	●		●	●	●		●	●				●	●	●						●				●			
细胞生物学			●	●		●						●			●	●		●			●						
医学诊断						●									●	●		●			●						
辐射治疗															●											●	
分子环境科学	●		●	●						●					●	●		●									
地质学	●		●	●	●		●	●				●		●	●				●			●					
工业制造与检测	●			●	●										●										●		●
药学及制药	●							●				●		●													

谱学技术作为分子环境科学研究的主要分析手段,在分子水平上动态分析污染物的形态、成分、来源、转移路径等,从而为评估污染风险和确定污染治理方案提供重要依据。而基于分子环境科学所建立起来的受环境污染的植物修复技术,可望产生重大的社会效益和经济效益。利用高亮度同步辐射 X 射线作为微探针,能够深入地了解地壳深处和地幔中矿物的演变和转化,对于矿床地质、矿物、岩石、探矿以及地球化学研究起着重要作用。

工业应用方面,在微细加工技术中,利用第三代同步辐射光源的 X 射线深度刻蚀技术(LIGA 技术),可制造肉眼难以看清的许多三维微型装置,并可进一步发展为高度智能化、集成化的微型电子-机械系统

(MEMS),它们在航天、医学、国防、自动化等许多领域有广阔可开发市场。随着集成电路的集成度越来越高,科学界预计,对线度在几十纳米及以下的集成电路,同步辐射光刻技术将有可能成为主要的光刻手段。在石化及化学工业中,利用上海光源可研究催化机理和催化剂的特性,这有助于研究发明新型催化剂,其结果直接影响到石油化工的效率和产出。上海光源也是研究新的电化学反应以开发高性能电池的利器。在许多其它产业研发与检测方面,如超大规模集成电路中硅晶片中的痕量杂质探测分析、飞机发动机和航天器的疲劳测试、化妆品效果分析乃至新口味凝胶食品的开发等方面,上海光源都将大显其非凡身手。

(相关图片请见封二、封三)