

# 合肥国家同步辐射实验室的现状与发展<sup>1)</sup>

张新夷

(中国科学技术大学合肥国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

**摘要** 简要介绍了中国科学技术大学合肥国家同步辐射实验室的运行情况、开展同步辐射应用研究的现状和今后的发展计划。同时还介绍了同步辐射研究的发展趋势, 对有可能取得重大突破的几个方面作了估计。

**关键词** 同步辐射, 同步辐射应用研究

**Abstract** We describe briefly the status and upgrading in the National Synchrotron Radiation Laboratory (NSRL), including the light source operation, synchrotron radiation applications and the future project — NSRL Phase II. Research prospects using synchrotron radiation and several important aspects where tremendous progress may be obtained are also indicated.

**Key words** synchrotron radiation, synchrotron radiation application research

## 1 X射线、激光与同步辐射

100年前, 即1895年11月8日, 德国物理学家伦琴发现了X射线。这一发现标志着现代物理学时代的到来, 对医学和工业界也产生了巨大的革命性影响。伦琴因此项发现而在1901年获得首次颁发的诺贝尔物理学奖。

20世纪60年代, 激光器的发明又极大地刺激了科学技术的发展, 很多领域的研究从此步入崭新的发展阶段。在激光器的发明以及光谱技术中应用激光器而作出杰出贡献的几位科学家也分别在1964年和1981年获得诺贝尔物理学奖。

同步辐射则是X射线和激光问世以后的又一种重要光源。众所周知, 当接近光速运动的电子在作弯曲轨道运动时会产生电磁辐射, 人们称这种电磁辐射为同步辐射<sup>[1,2]</sup>。它具有一系列优异的特性, 如亮度高, 光谱连续, 频谱范围宽, 高度偏振性, 准直性好, 具有脉冲时间结构

以及光谱可精确计算等。很多以往用普通X射线和激光无法开展的研究工作因为同步辐射的应用而得以实现。在X射线波段, 同步辐射也

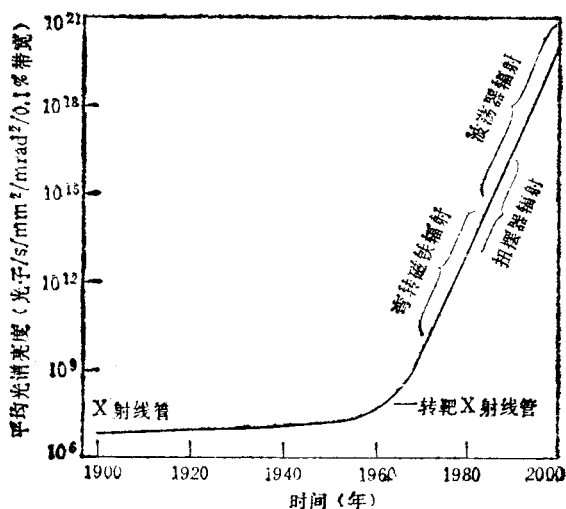


图1 普通X射线和同步辐射亮度的比较  
(扭摆器和波荡器是两种安装在储存环上的插入件, 目的是为了得到亮度更高、性能更好的同步辐射)

1) 1995年6月29日收到。

是连续分布的。在可见光区域,虽然激光单线的强度要比同步辐射高,但在可见光区以外的频谱范围,目前尚没有激光可与同步辐射相比。图1给出整个20世纪由X射线管和同步辐射光源亮度的比较,可以看出,同步辐射比X射线管的亮度提高了几个数量级。

由于同步辐射的优异性质,它的应用面极广,涉及几乎所有的科技领域,如物理、化学、材料科学、生命科学、信息科学、力学、地学、医学、药学、农学、环境科学、计量科学以及亚微米光刻和超微细加工等技术科学。正因为如此,世界上很多发达国家,乃至一些发展中国家都不惜巨额投资,竞相建设同步辐射光源。目前世界上已经运行和正在建造中的同步辐射光源已经超过50台。

## 2 同步辐射应用研究的发展趋势

关于同步辐射应用研究的介绍已有不少报道<sup>[1,2]</sup>。这里不再一一列举。从发展趋势而言,我们把同步辐射应用研究大致归纳如下:

(1) 光谱、光电子能谱等谱学方法,主要研究物质的电子结构。对了解和制备各种功能材料,实现“能带工程”及原子分子科学、化学动力学、表面科学等方面的研究会发挥越来越大的作用。

(2) X射线衍射、散射与吸收精细结构等分析技术,主要研究物质的原子结构。它大大地促进了生物大分子晶体结构与功能的关系和高分辨粉末衍射两大领域的研究工作。生物大分子晶体结构时间分辨测量的实现是对生物晶体学的一大贡献。可以预言,对生物大分子晶体结构与功能关系的研究很可能会有重大突破,其意义不会亚于近代任何一项已经获得诺贝尔奖的研究工作对人类的贡献。

(3) 显微成像技术。它包括形貌术、层析术和全息术等。利用它对活体生物样品进行细胞或组织水平上的直接观察和用于细观力学研究会有重大突破。

(4) X射线光刻和超微细加工技术(即

LIGA技术,LIGA由德文光刻、电铸制模和注模复制三个词的词头拼成),使微型机械、微电子器件和微光电子器件的制造成为可能,估计将在下世纪初形成新的产业。

由于同步辐射的优异性能,使一些研究工作独具特色。例如,进行光电子能谱实验时,可以在很大的能量范围内选择合适的光子能量,以达到最大的表面灵敏度;由于同步辐射在X射线波段强度高且光谱连续分布,因此可以在很短时间(秒甚至毫秒量级)内以很高的分辨率记录下物质的原子结构,实现了对物质的原子结构进行时间分辨测量;具有相干性的X射线的获得,使X射线全息术的发展见到了曙光;X射线的强穿透性使光刻的刻蚀深度可达几百甚至1000 $\mu\text{m}$ 以上,正是由于X射线深度光刻的成功才使人们长期向往制作总尺度小于1mm的微型马达、执行器、耦合器、传感器等微器件的梦想得到实现。

同步辐射及其应用研究有可能取得的突破,就象X射线和激光的发明一样,将会在世界科技发展史上获得它应有的地位。

## 3 合肥同步辐射光源的现状

合肥光源(HLS)建在中国科学技术大学国家同步辐射实验室(NSRL),是我国第一台专用的同步辐射光源。它的主体设备由200MeV的电子直线加速器和能量为800MeV的电子储存环组成(如图2所示)。直线加速器作注入器用,将能量为200MeV的电子注入到电子储存环中,在环中电子再被加速到800MeV,然后在环中稳定地回旋,直到下一轮注入。在HLS的电子储存环上,安装有12块能改变电子运动方向的弯转磁铁。当电子经过弯转磁铁时,在电子轨道的切线方向产生同步辐射。在每块弯转磁铁上可有两个发光点,从每个发光点引出的同步辐射又可分为两束,分别供两个实验站使用。因此,在NSRL可以建大约50条光束线和50个实验站。同步辐射的光子能量范围是由储存环中的电子能量和电子轨道的

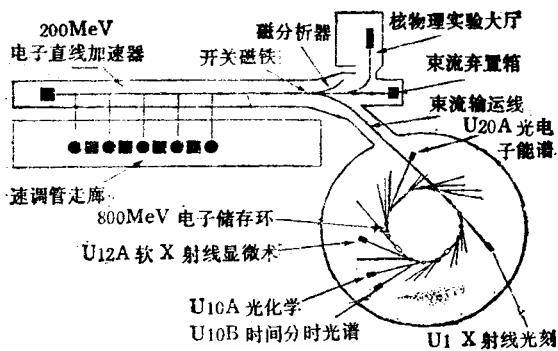


图2 合肥同步辐射装置平面示意图

曲率半径所决定的。HLS 的同步辐射主要是在真空紫外和软 X 射线波段，特征波长为 2.4 nm，可用的最短波长为 0.5nm。NSRL 于 1991 年建成第一批五个实验站，它们分别是：光电子能谱、X 射线光刻、时间分辨光谱、光化学和软 X 射线显微术。HLS 和这些实验站累计运行了近 17 000h，1992—1994 年的运行情况如图 3 所示。1994 年机器运用时间已超过 6000 h，供实验用光时间约 4000h，包括德国、法国

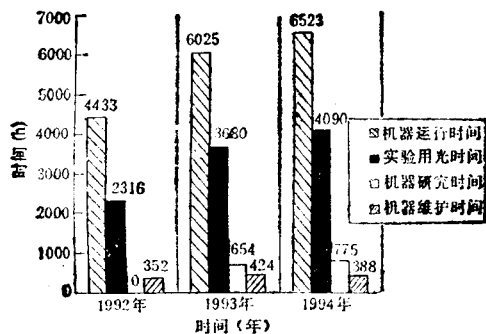


图3 1992—1994 年 NSRL 运行时间统计

等中外很多用户以及 NSRL 的科学家在这些实验站已做出了一批很有价值的研究成果<sup>[3,4]</sup>。现将部分结果列举如下：

- (1) X 射线光刻得到了线宽小于 0.2 $\mu\text{m}$  的图形。
- (2) 超微细加工 (LIGA)，在金属材料上做出厚度超过 50 $\mu\text{m}$  的微结构。
- (3) 做出宽度小于 50nm 的量子线。
- (4) 砷化镓表面淀积锰超薄膜的光电子能谱研究，发现存在磁(自旋)有序现象。

(5) III—V 族、II—VI 族半导体和 C<sub>60</sub> 等表面与界面的电子结构研究，观察到半导体与金属原子之间不同形式的相互作用。

(6) C<sub>60</sub>、多孔硅、闪烁体等光电功能材料的光谱研究，获得关于元激发及激发态动力学过程方面的信息。

(7) 多种分子及团簇的电离势、里德伯态和化学键离解能的测定。

(8) 二元团簇内部化学反应及电荷转移过程的研究。

(9) 癌变细胞等生物样品在含水状态下的软 X 射线显微图象的获得。

(10) 在国内首次做出 X 射线全息图样。

为了扩展同步辐射应用研究的领域，NSRL 正在建设一个磁场强度为 6T 的超导磁铁扭摆器 (wiggler)，这是一种安装在储存环上的插入件，电子束在通过该插入件时可产生波长更短的同步辐射。经过计算，NSRL 的超导扭摆器建成后，可获得波长短到 0.1nm 的硬 X 射线，建立相应的 X 射线衍射、散射以及 X 射线吸收精细结构 (XAFS) 实验站，开展以原子结构为主的研究工作。

## 4 展望未来

合肥同步辐射光源是一台性能优良的真空紫外及软 X 射线专用光源。1993 年 4 月国家同步辐射实验室正式向国内外开放以来，要求做实验的用户越来越多，现有的 5 个实验站已远不能满足需要，而且对光源的要求也越来越高。为此，NSRL 期待在本世纪最后几年进行二期工程建设，计划增建 8 条光束线和 8 个实验站，新建插入元件——波荡器 (undulator，由波荡器引出的同步辐射是可调谐的准单色光，具有相干性，亮度比弯铁辐射提高约 3 个数量级)大幅度提高光源的亮度和稳定性，以适应我国科学和技术发展的需要，在世界科技前沿争得一席之地。

表 1 列出了新建实验站上开展研究工作所涉及的领域，表中同时列出正在建设中的

表1 NSRL 实验站开展的研究工作领域

	材料科学	信息科学	生命科学	凝聚态物理	化学	原子分子物理	超微加工	状态
表面物理	✓	✓		✓	✓			设计中
X射线衍射与散射	✓		✓	✓				设计中
LIGA		✓					✓	设计中
原子分子物理			✓		✓	✓		设计中
光热和光声光谱	✓	✓		✓				设计中
红外与远红外光谱	✓	✓		✓	✓	✓		设计中
软X射线磁性圆二色	✓	✓	✓	✓				设计中
光谱辐射基准和计量测试	✓	✓		✓				设计中
XAFS	✓			✓				建设中
光电子能谱	✓	✓		✓				已运行
时间分辨光谱	✓	✓	✓	✓				已运行
光化学					✓	✓		已运行
软X射线显微术	✓		✓	✓				已运行
X射线光刻		✓					✓	已运行

XAFS 和已运行的实验站的有关情况。

NSRL 二期工程中计划增建的 8 个实验站简要介绍如下:

#### 4.1 表面物理实验站

具有角分辨能力的光电子能谱是目前唯一可作能带结构直接测定的实验手段。本实验站具备原位材料制备、表面电子结构测量和表面原子结构测量三方面功能,用于研究晶体和半导体材料的能带结构,实现新型人工材料能带结构的设计和“剪裁”。

#### 4.2 X 射线衍射与散射实验站

利用合肥光源的超导扭摆器辐射,实现尺度小到 1mm 左右的生物大分子晶体的 X 射线衍射及多波长反常散射数据的收集,为从事生物大分子晶体学和结构生物学研究的科学家提供我国自己的研究基地。

#### 4.3 LIGA 实验站

以同步辐射 X 射线深度光刻技术为核心,开展包括电铸和注模复制的 LIGA 工艺研究以及微型机械、微光学和微光电子学产品的设计及研制。

#### 4.4 原子分子实验站

利用波荡器辐射研究原子和分子的价电子及内壳层电子的激发、电离等过程,为从事原子分子物理、分子反应动力学、激光化学和结构化学研究的科学工作者提供理想的多功能研究手段。

#### 4.5 光热和光声光谱实验站

建立高灵敏度同步辐射光热光谱仪,并兼用于真空紫外光声光谱测量,为研究薄膜、多层膜材料等的真空紫外波段的光学和热学性质提供一种新的手段,填补我国在这一领域的空白。

#### 4.6 红外与远红外光谱实验站

同步辐射在红外、远红外光谱区的应用是红外光谱学的一大突破。主要研究方向是发现新的光谱结构,指导设计新型功能材料和器件,开拓新的应用技术领域。

#### 4.7 软 X 射线磁性圆二色实验站

利用圆偏振同步辐射光把法拉第效应和克尔效应扩展到远真空紫外 (XUV) 和软 X 射线波段,研究超薄膜和多层膜等复杂体系的磁性,为开发新型磁性功能材料和开展含金属蛋白质

分子的电子结构研究提供最有效的工具。

#### 4.8 光谱辐射基准和计量测试实验站

利用同步辐射的光谱能量分布可以精确计算的特性,建立真空紫外—软X射线光谱辐射基准,使我国的光谱辐射国家标准由近红外—可见—紫外延伸到真空紫外—软X射线波段,并使我国可能参加同步辐射型光谱基准的国际比对。

为保证 HLS 的长期、可靠和稳定运行,并

提高光源性能,在 NSRL 二期工程中,计划建造一个波荡器和对加速器各分系统进行改造,达到提到光源的亮度和稳定性,减小故障率的目标。根据用户需求的迫切性,我们把波荡器辐射的波长范围设计在 10—200nm,其亮度将比弯转磁铁的辐射提高 2—3 个数量级(见图 4)。

#### 5 结束语

同步辐射装置是为众多“小科学”服务的“大科学”工程装置,它为多学科的科学家提供十分有效的研究手段。而且从事各类学科的基础研究和技术研究的科学家们同在一个实验室工作,可以互相交流和讨论各自的结果和学术思想,这无疑为新兴、交叉学科的发展提供了极好的学术气氛。我们期待着国家同步辐射实验室为我国的科学技术进步发挥越来越重要的作用,未来的同步辐射事业会越来越兴旺。

#### 参 考 文 献

- [1] 洗鼎昌,神奇的光——同步辐射,湖南教育出版社,(1994)。
- [2] 张新夷,科学,47-3(1995),21。
- [3] Yunwu Zhang, Chaoshu Shi, Pengshou Xu et al., *Rev. Sci. Instr.*, 66 (1995), 1826。
- [4] Zhang Xinyi, to be presented in the VUV-11 Conf., Tokyo, Aug. 1995.

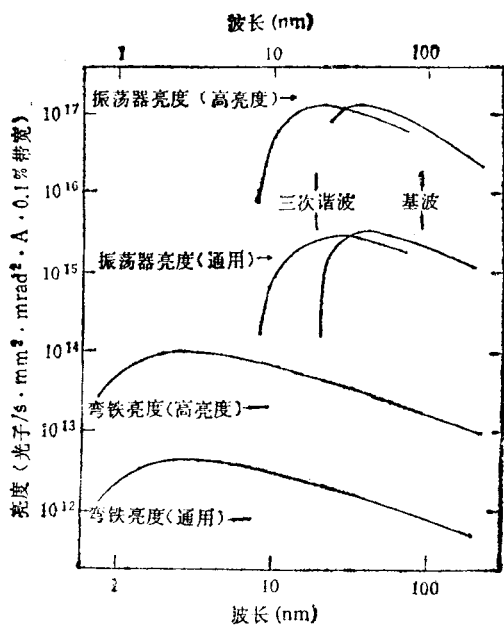


图 4 合肥光源波荡器与弯转磁铁辐射光谱亮度曲线