

同步辐射应用在中国的发展*

洗 鼎 昌

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘 要 简要介绍了近 10 年来同步辐射应用在中国的发展情况.

关键词 同步辐射应用,发展,中国

DEVELOPMENT OF SYNCHROTRON RADIATION APPLICATIONS IN CHINA

Xian Dingchang

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract The development of synchrotron radiation applications in the past decade in China is briefly reviewed.

Key words synchrotron radiation applications, development, China

1 引言

同步辐射(synchrotron radiation, SR)是由以接近光速运动的带电粒子放出的具有独特性质的电磁辐射.它最先为理论物理学家所预言,1947年在实验室里被发现.在此后相当长的一段时间内,为了核物理和粒子物理的研究,世界进入了建造能量越来越高的加速器的阶段,这时,同步辐射被认为是一种妨碍提高粒子能量的不受欢迎的因素.但是,经过 10 多年的研究,同步辐射的巨大优点终于被科学界所认识,在 70 年代里出现了在进行粒子物理实验的加速器上添设同步辐射研究应用装置,一般称为第一代同步辐射装置.由于同步辐射巨大的优越性,依附于高能加速器的第一代同步辐射装置很快便不能满足广大用户的要求,在 80 年代里出现了为数众多的专为产生同步辐射的装置,它们被称为第二代同步辐射装置.当代科技研

究应用前沿对更高的亮度、更方便的偏振选择、更好的相干性和更好的时间分辨的要求,促进了从 90 年代中起,新一代,也就是被称为第三代的同步辐射装置陆续出现.在 90 年代初,北京和合肥先后建成了两个能量分别为 2.2—2.8 GeV 和 800 MeV 的同步辐射装置,它们分别属于第一和第二代^[1,2].此外,90 年代中,在台湾新竹建成了一个能量为 1.3 GeV 的第三代同步辐射装置^[3].

2 北京和合肥两个同步辐射装置简介

北京和合肥两个同步辐射装置的简介见表 1.

由表 1 可见,北京的装置偏重于进行 X 射线领域的同步辐射研究应用,合肥的装置偏重

* 国家自然科学基金资助项目

1999 - 08 - 05 收到

表1 北京和合肥两个同步辐射装置指标简介

装置名称	BSRF(北京)	NSRL(合肥)
电子能量	2.2—2.8 GeV	800 MeV
电子束流	30—50 mA(兼用) 60—100 mA(专用)	100—300 mA
发射度	390 nm·rad(兼用) 76 nm·rad(专用)	166 nm·rad
特征波长	5.41 Å(2.2 GeV) 2.63 Å(2.8 GeV)	24 Å 4.8 Å(6 T)
束流寿命	10h	>8h
插入件	1 波长移动器(1.8 T) 1 多极扭摆器(1.5 T)	1 超导扭摆器(6 T)
SR窗口	4	5
SR光束线数	7 X, 2 SX, VUV	1 X, 5 SX, VUV
SR实验站数	11	6

表2 目前提供的一些X射线SR束线及应用领域

研究领域	研究方法	同步光束线
大分子结构及蛋白晶体学	衍射	北京:4 W1 C
痕量元素分析	微探针, 微束 CT	北京:4 W1 A,4 W1 C 合肥:U7 C
凝聚态, 材料中的微结构	形貌学, 衍射,SAXS EXAFS	北京:4 W1 A,4 W1 B 4 W1 C,4 B9 A 合肥:U7 C
生理科学	衍射,SAXS	北京:4 W1 A,4 B9 A
地矿科学	荧光,衍射, EXAFS	北京:4 W1 A,4 W1 B 合肥:U7 C
高压科学	EXAFS	北京:4 W1 A,3 W1
催化	衍射 EXAFS	北京:4 W1 A,4 W1 B 合肥:U7 C
药理学	衍射, EXAFS,SAXS	北京:4 W1 A,4 B9 A, 4 W1 B 合肥:U7 C
材料科学	衍射,EXAFS, SAXS	北京:4 W1 A,3 W1, 4 B9 A,4 W1 C 合肥:U7 C
微机电系统加工	LIGA	北京:3 W1,3 B1 合肥:U1
液体及溶液	EXAFS,SAXS	北京:4 W1 A,4 W1 C, 4 B9 A 合肥:U7 C

于软 X 射线(SX)及真空紫外光(VUV)领域的同步辐射研究应用。

自从这两个装置在 90 年代初陆续投入运行后,越来越多的用户在其上使用这些先进的光源,得到不少好的结果,其中有些是非用同步辐射不能得到的,更重要的是还开辟了一些新

的领域.例如:X射线吸收谱精细结构的应用,SR基本上已经代替了常规的实验室 X 射线源,用户除了来自传统的物理和化学领域之外,扩展到包括地矿、生物、催化、化工等相当广泛的领域;高压物理的研究因 SR 的使用而从长期停顿的状态中走了出来;在下一个世纪中具有巨大前途的微机电系统的生产工艺研究,国外一个正在急速发展的技术——超细微加工(LIGA)技术也因为有了 SR 在国内得以开展,等等。

为了帮助用户和潜在的用户对这两个装置作进一步的了解,我们在表 2 和表 3 中分别列出一些研究领域,可能使用该两装置在 X 波段和 SX-VUV 波段中的束线。

表3 目前提供的一些SX-VUV光束线及应用领域

研究领域	研究方法	同步光束线
生命科学, 医学	SX显微学	北京:3 B1 C 合肥:U12 A
药理学, 化工	圆二色谱学	北京:3 B1 B
微电子技术	亚微米 SX 光刻	北京:3 B1 A, 合肥:U1
光化学动力学	时间分辨谱学	合肥:U10 A
表面科学	光电子谱学	北京:4 B9 B 合肥:U20
SX 计量学	反射谱学, 吸收谱学	北京:3 W1 B
催化	光电子谱学	北京:4 B9 B 合肥:U20

3 几年来同步辐射应用开展的部分工作简介

自从北京和合肥两个同步辐射装置建成之后,各地用户在其上进行了大量的研究应用工作,以下只能介绍其中的一小部分.相信即使通过这些部分的介绍也可以看到同步辐射为我国宽广的科技领域带来的重大促进作用。

3.1 高压下的物性研究

虽然在 1980 年中国科学院物理研究所的科学家已经在实验室中得到了高达 178 GPa,也即是 178 万个大气压的压强(在当时世界上达到这个水平的只有几个实验室),但是研究工作

物理

在这以后实际上是停顿了,因为缺乏先进的分析手段——用常规 X 射线源对在如此高压下的样品进行结构分析,要连续 17 个昼夜——所以实际上不可能得到有意义的结果.1993 年,物理研究所和 BSRF 的科学家、工程师合作,在 BSRF 上建成了一个高压 X 射线衍射站,利用金刚石对顶砧和多色光同步辐射的 X 射线能量色散衍射方法,成功地进行了在百万大气压下的物性的研究.图 1 是直至 115 GPa 高压下 B_2 型碱卤化合物的相变研究^[4].在常温下, CsBr, CsCl 和 CsI 有着异于 NaCl 的 B_1 型的结构,人们预期在 100 GPa 以上的高压下它们会发生从绝缘相到金属相的相变过程.但是由能量色散衍射图 1 可以看到,从大气压直到 115 GPa 的不同压强下, CsBr 除了在 53 GPa 附近有一个从简单立方相变为四方相的相变之外 [表现为(110)峰劈裂为(011)与(111)两个峰], 没有预期的从绝缘相到金属相的相变发生.

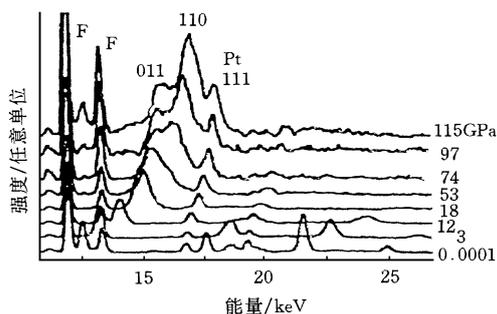


图 1 高压 X 射线衍射能量色散衍射图

近年来,在凝聚态物理的前沿热点研究中,同步辐射也被应用到诸如团簇、 C_{60} 、氧化物高温超导体等物质在高压、高温下的物性研究^[5,6].

除了物理学家之外,地球化学家也开展了同步辐射的应用.他们研究了钙钛矿结构下地幔矿物在高温高压下的状态方程^[7],从而开展对地球内部状态、能量传入过程、矿岩成因的模型研究.这是很有前途的研究方向.

3.2 同步辐射光电子谱学应用

无论在北京或在合肥,对光电子谱实验站的机时要求都是巨大的,在其上开展了许多只

有用同步辐射才能进行的研究,得到了一些很有意义的结果.这里给出两个在 NSRL 上得到的成果.

长久以来,人们知道作为半导体材料, GaAs 有着巨大的优越性,但是必须对其表面进行有效的 S 钝化处理以形成表面的钝化层.在合肥发展了一种新的钝化 GaAs(100) 表面的污染少、操作简便的方法^[8].图 2 是利用同步辐射光电子能谱对此方法的分析,它可以克服通常 X 射线源无法分辨 Ga3d 和 As3d 芯能级的缺点,可直接得到 S 与 GaAs 键合的证据.

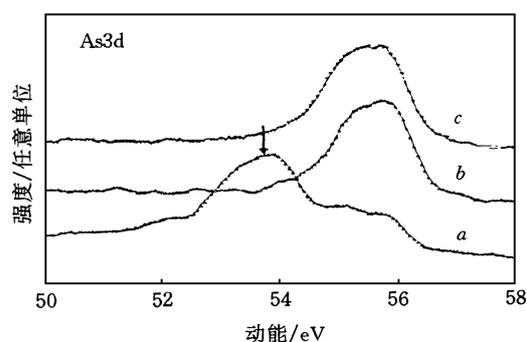


图 2 光电子能谱

图 3 是关于 Mn 超薄膜的磁有序结构的研究^[9],这是一个很有意义的工作.通常情况下,体态的 Mn 是非铁磁性的,但此研究表明,在超薄膜的情况下,它会表现出磁有序结构:当 Mn 的

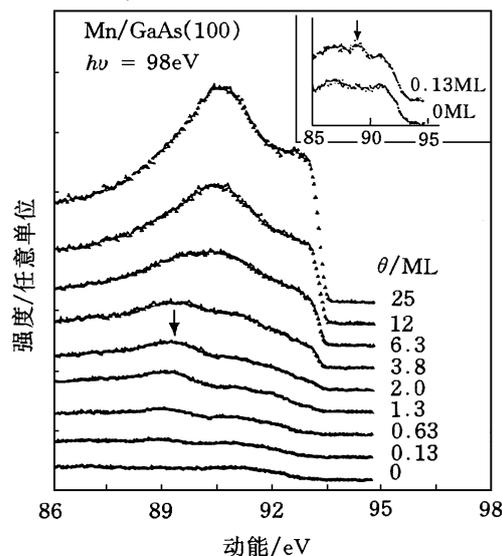


图 3 关于 Mn 超薄膜的磁有序结构

覆盖层达 0.13 单层 (ML) 时,位于费米能级 (E_F) 以下 3.9eV 处出现一个新峰,它来源于 Mn3d 自旋向上的子带的贡献.在覆盖小于 2 ML 时,它逐渐增强,但当覆盖高于 3.8 ML 后它又逐渐消失,此时在位于 E_F 以下 3eV 处出现一个占主导地位的体态峰.可见仅在覆盖度为 0.13 ML 至 2 ML 之间, Mn 薄膜才出现磁有序结构.

3.3 同步辐射在地矿及环保科学中的应用

同步辐射为地矿及环保科学开辟了巨大的应用前景.这里给出两个在 BSRF 上进行工作的例子.

贵州一些地方(例如兴仁、兴义县)的高砷无烟煤已经给当地居民的健康造成严重毒害.为了解决此问题,必须弄清砷的赋存状态及其在热解、气化过程中的变化.在这些方面,同步辐射是十分有力的手段.对贵州兴仁、兴义县晚二叠世高砷煤矿中砷赋存状态的 EXAFS 研究结果^[10]表明,砷是以砷酸盐或亚砷酸盐的形式存在于煤的有机组分中,而且主要是砷酸盐形式.此工作中,BSRF 设备的灵敏度可达 50 $\mu\text{g/g}$

的低浓度,若改进探测器系统,灵敏度还可以提高.由此也可以看到进行微量元素赋存状态研究的广阔前景.

除了确定元素的赋存状态之外,利用同步辐射的高亮度,还可以进行微束 X 射线扫描荧光分析,从而得出在矿物中主要元素和微量元素的相关性,由此确定矿床的成因,这对于采矿及冶炼有着很大的实际意义.图 4 是新疆哈图金矿中几个典型元素的二维分布^[11],由此作者推断矿床中的 Au 与 Pt 很可能和矿区外围超基性岩属于同源,来自地幔,所不同者是海底喷出,而非侵入.

微束 X 射线扫描荧光分析已经被应用于油气储层评价^[12],在应用中最吸引人之处是揭示了对矿物的包裹体进行非破坏测量的可行性.不久前,一项应用 BSRF 设备进行研究的报告^[13]称,成功进行了流体包裹体所含元素的无损探测,图 5 是其探测结果的初步报道.这是只有用同步辐射才能实现的.包裹体中的微量元素、液体或气体是当初矿物形成时地质条件的记载,其信息有着巨大理论与实用的价值.

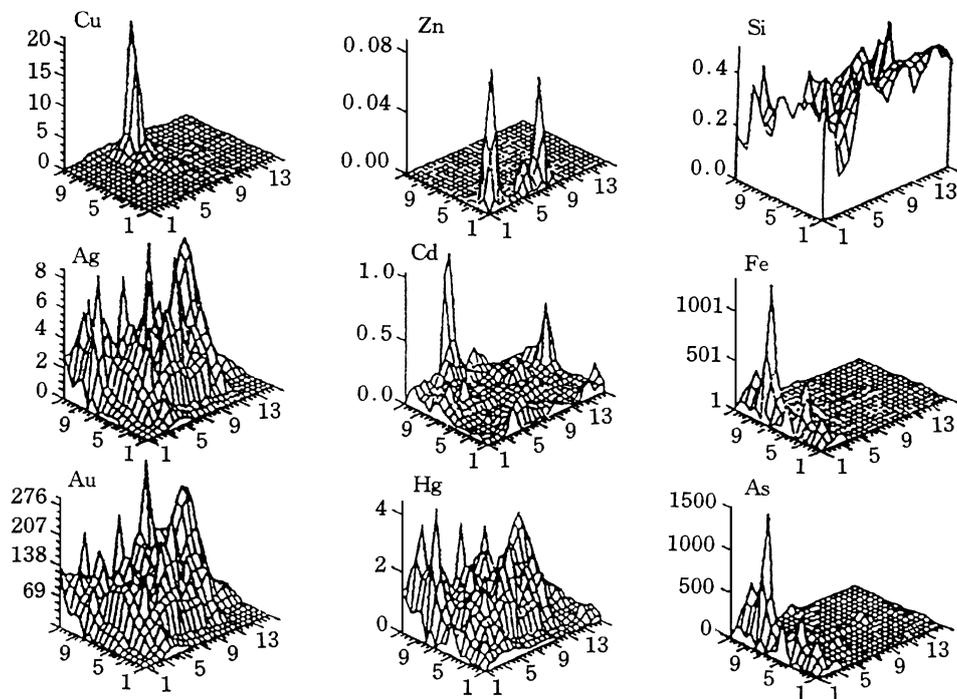


图 4 新疆哈图金矿中几个典型元素的二维分布

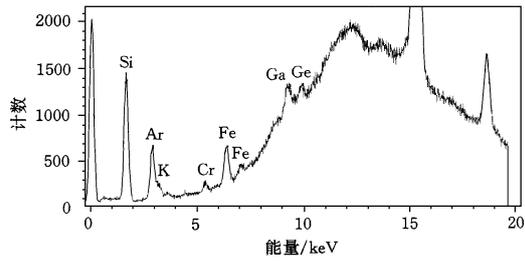


图5 流体包裹体所含元素的无损探测结果

3.4 亚微米光刻技术及用于微系统加工的 LIGA 技术的进展

在北京和合肥两个装置上,都建有软 X 射线同步辐射光刻站,开展了亚微米同步辐射光刻技术的研究.估计在下世纪初,0.15 μm 以下线宽器件的光刻将要使用同步辐射或电子束来曝光.

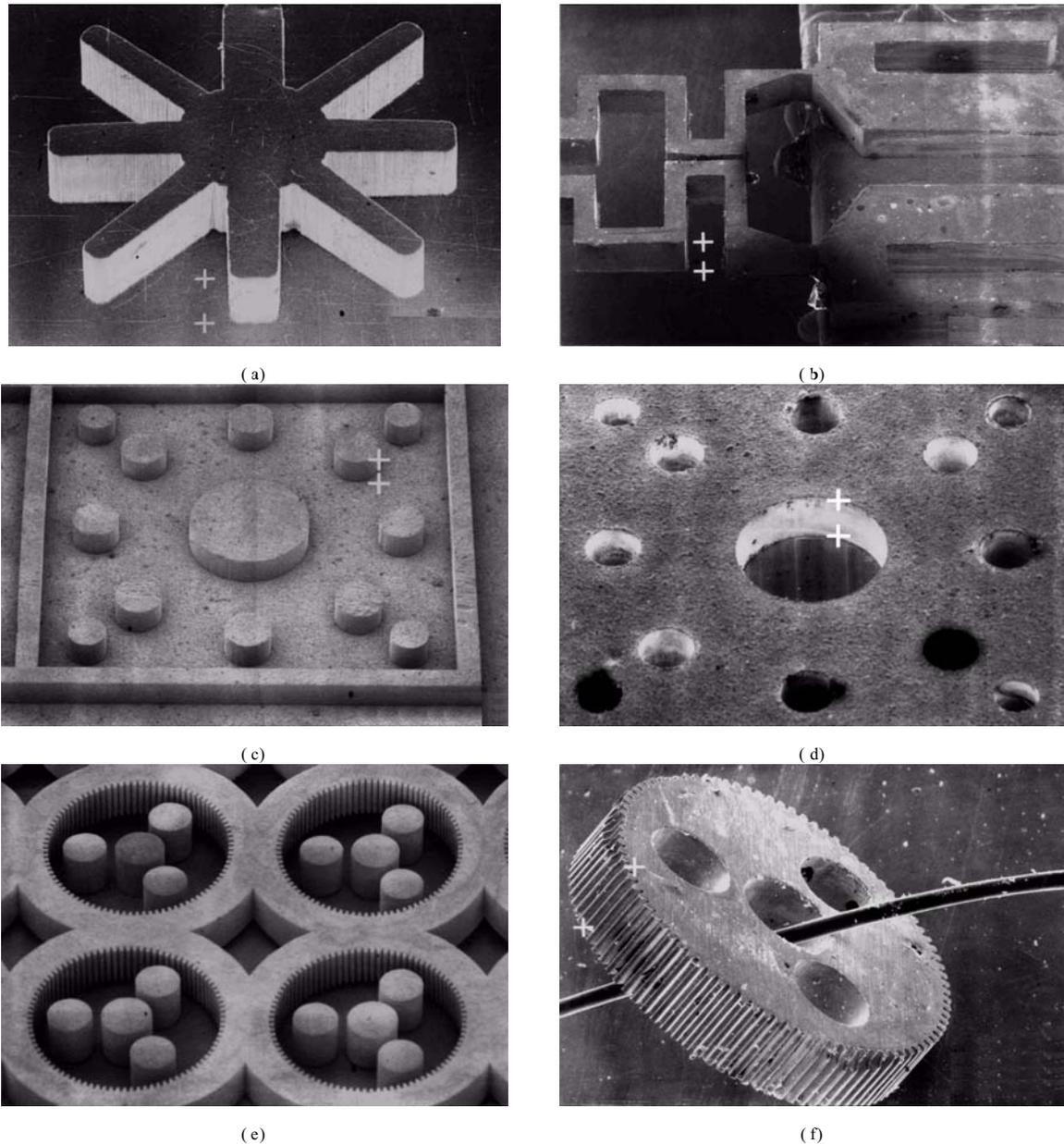


图6 在 BSRF 进行的 LIGA 技术研究得到的一些结果
 (a) LIGA 技术掩模; (b) 夹钳金属镍结构; (c) 电机基板 PMMA 结构; (d) 电机基板金属铜结构;
 (e) 电机转子齿 PMMA 结构; (f) 电机转子齿金属镍结构

近年来,国际上先进国家竞相开展将光、机、电集成为一个微系统的技术研究,因为它有着巨大的产业前景.如果说电路方面的微电子技术是比较成熟的话,能够大规模地进行微机械系统生产的技术相对说来就还处在年轻得多的阶段,不久前发展起来的 LIGA 技术就是一种很有前途的技术. LIGA 是首先在德国发展起来的一种综合技术^[13],它来自几个关键技术的德文名称: lithographie(光刻), galvanofornung(电铸成型)和 abformung(塑铸成型)的字头.其中的第一步技术就是用同步辐射做深度光刻.和亚微米光刻不同,这里追求的不是越来越细的线宽,而是越来越大的深宽比.进行这种深度光刻的光源的波长必须较短,如果要求深度为几十到几百微米,那么所使用的光波长应当是从 2 Å 到 12 Å,而且应当非常平行,具有足够的强度.只有同步辐射能够提供这样的光.国外目前的进展情况是已经基本上从实验室研究阶段过渡到工业开发的阶段.在北京与合肥两个装置上都有这个波长范围的同步光,已经开展了这方面的技术研究.图 6 为在 BSRF 进行的 LIGA 技术研究所得的一些结果^[14].

目前国际上普遍认为, LIGA 技术是大规模微机电系统加工的一个极重要的方向,便于进行大批量生产,有着巨大的发展前景.这是一个说明科学与新技术结合给工业带来巨大新机遇的例子,通过它可以看到下一个世纪科学技术发展的特征,这就是不同学科之间与科学和技术之间高度的交叉与融合.我们物理学家应当很高兴看到在目前国内已经建立起来的基础上,物理学家能够在一个呼之欲出的新的高科技产业中所能发挥的重大作用.

4 “九五”与“十五”期间我国同步辐射应用的发展

90 年代初建成的第一代同步光源(北京)和第二代同步光源(合肥)已经连续投入使用,在性能上不断进行改进,但是广大用户的需要和实际上能够提供的机时一直是国内同步

辐射应用的主要矛盾.为了解决这个根本矛盾,适应当代科技发展对更先进的光源的要求,国家批准了在上海开展建造一个电子能量为 3.5 GeV 的第三代同步光源的预研.如何在国家今后一个时期中经济发展的现实条件下,使它们成为一个真正能够对我国跨世纪的科技发展起重大的推动作用的有机体系,必须有统一的规划以最有效地发挥这些装置的能力,最大限度地利用相当紧张的财力与人力资源.在上海光源建成之前,可使用的同步辐射装置为北京与合肥的两个装置,前者的优势在 X 射线波段,后者的优势在波长比较 X 射线长的波段,这两个波段是互补的.目前,前者的缺点在于是兼用的第一代光源,机时需与高能物理共分,光强受到限制,远不能满足用户的要求;后者的缺点在于在长期稳定运行上尚有差距,同样不能满足用户的要求;二者都有着部件老化,设备有待完善、改进、提高的迫切问题.这些问题不解决,是无法做到最有效地发挥它们的能力的.

世界上至今尚有不少第一代同步辐射装置在出色地工作着(如美国康耐尔大学的 CHESS 和德国汉堡的 HASYLAB),而且在可见的将来它们仍然会保持它们作为某一些研究应用领域的中心的地位.其道理在于并非所有的科学技术的研究、应用都要求高空间分辨或高时间分辨的实验,相反,有一些应用甚至要求较大的光斑,例如微细机械加工的 LIGA 技术;另外,作为实验上仪器与方法学发展的预研基地,思想的领先是最关键的,作为发展思想的可行性研究的手段,第一代光源是胜任的.总的说来,北京的第一代装置在今后 10 年期间应当充分发挥其在 X 射线波段中不要求(或较低要求)时间与空间分辨的实验的能力,以及在各种需要较大束斑的科学实验和工业技术上的应用.此外,还要充分发挥它在 X 射线领域中热载、插入件技术、束流位置控制、实验仪器与方法学(包括在空间及时间上分辨的及非分辨的)等方面发展的预研基地的作用,为第三代光源的应用做好准备.

当前世界上正在运行着的大部分同步光源

是第二代装置,预计到下一世纪的头10年这个情况不会有根本的改变.目前,能量低于2 GeV的储存环的世界水平是:束流强度为数百毫安,束流寿命为数十小时,能长期稳定运行.合肥的装置需要以这个水平为目标进行改进,才能最有效地发挥它的作用,在软X射线、真空紫外甚至红外波长的范围中对我国的科技发展作出重大的贡献.插入件的增设,特别是超导扭摆器的安装,不但对拓宽光源的能量上限有很大的意义,而且通过它取得的强磁场插入件对束流动力学的影响的经验,对第三代光源的建造是十分有益的.适当地增加最为用户所需的光束线和实验站是“九五”和“十五”期间合肥装置的另一大任务,这些束线与实验站应充分利用光源的高亮度开展高能量分辨、非弹性散射、中等空间分辨与时间分辨等方面的研究应用工作.

第三代同步辐射装置是目前世界各国同步光源发展的重点,上海的第三代装置的性能设计应当在建成时居世界的前列,建成后在其上主要开展诸如高空间分辨、高时间分辨、高能量分辨、高动量分辨等尖端领域的研究工作.要及早规划在其上的工业应用.

目前,世界上同步辐射应用的现状是:加速器的发展居领先的地位,推动着束线光学和实验应用思想的迅速发展,相比起来探测手段居落后的地位,特别是在第三代光源出现的情况下.在上海第三代光源建造之初,就必须对这个问题有足够的认识,把它提到应有的高度来认

真对待.必须有发展我国新的探测手段与新的实验方法的力量,不能只是把眼睛盯着国外的新产品.应当充分调度在北京和合肥两个中心的科技力量(其中尤以在北京的力量为最强),预为之计.这方面的一些预研是可以与第三代光源的建造有计划地并头进行的.

致谢 感谢在BSRF和NSRL两个装置上的同事在作者撰写本文中所提供的素材和大力的帮助.

参 考 文 献

- [1] Tang E S, Xian D C. Synchrotron Radiation Facilities in Asia. Tokyo: Ionics Publication, 1994. 143
- [2] Liu Z P, Zhang X Y. J. Synchrotron Rad., 1998, 8: 1170
- [3] Liu Y C. Synchrotron Radiation Facilities in Asia. Tokyo: Ionics Publication, 1994. 1
- [4] Wang L J, Chen L C, Li F Y *et al.* Chinese Phys. Lett., 1998, 15: 284
- [5] Wang J F *et al.* Chinese Phys. Lett., 1993, 10: 159
- [6] Chen L C *et al.* Chinese Phys. Lett., 1996, 13: 534
- [7] 翁克雄等. 硅酸盐钙钛矿的性质及下地幔矿物学. 见:《第八届全国高压学术讨论会》. 1995. 28
- [8] Lu Z H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1993, 62: 2932; Lu E D *et al.* 1996, 69: 2282
- [9] Jin X *et al.* Phys. Rev. B, 1995, 51: 9702
- [10] 赵峰华等. 科学通报, 1998, 43: 1549
- [11] 丁奎首等. 科学通报, 1993, 38: 403
- [12] 李葵发等. 物理, 1995, 24: 755—758
- [13] 李葵发等. 同步辐射 X射线荧光微探针单个流体包裹体的探测分析. 见:《BSRF99年用户会议》, 1999. 8
- [14] Yi F, Jin M, Tang E *et al.* Microsystem Technologies, 1996(3): 7—9