



# 同步辐射讲座

## 第四讲 同步辐射光 50 年

麦 振 洪

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

**摘 要** 自 1946 年 Blewett 首次观察到同步辐射光至今已经 55 年. 文章回顾了同步辐射光源的发展历史, 着重介绍了同步辐射光源的性质, 并简要介绍了同步辐射在生命科学、材料科学、原子分子科学、地球科学和环境科学以及工业等领域中的应用.

**关键词** 同步辐射, X 射线, 同步辐射应用

### FIFTY YEARS OF SYNCHROTRON RADIATION

MAI Zhen-Hong

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Fifty-five years have passed since synchrotron radiation was discovered by Blewett in 1946. In this article the history of synchrotron radiation sources is reviewed, with particular attention to the properties of the radiation. Applications in the biological, materials, atomic and molecular, geological and environmental sciences are discussed briefly, as well as links with industry.

**Key words** synchrotron radiation, X-ray, synchrotron radiation applications

## 1 前言

同步辐射(synchrotron radiation, 简称 SR)是高能电子或正电子作加速运动时所发射的电磁辐射.

1946 年, Blewett<sup>[1]</sup>首先在电子加速器上观察到 SR, 标志着一种新的光源时代开始, 它导致世界范围内很多国家为之作出了巨大的努力. 目前, 世界上已建成的 SR 装置有 70 多个, 正在建设或计划建设的有 20 多个. 我国目前三个 SR 装置: 北京正负电子对撞机国家实验室(BEPC)的同步辐射装置(BSRF)于 1988 年建成、出光; 合肥国家同步辐射实验装置(HFSRF)于 1989 年建成、出光; 中国台湾同步辐射装置(SRRC)于 1991 年建成、出光. 我国政府对 SR 装置的发展给予高度的重视和支持, 正在筹备建造第三代 SR 装置——上海光源(SSRF), 同时, 对 HFSRF 和 BEPC 的改造给予了很大的经费支持. 可以肯定, 在不远的将来, 中国的 SR 光源和实验装置将有较大的发展, 将为科学研究和工业应用提供一个重要的舞台.

本刊连载的“同步辐射讲座”已部分介绍了 SR 光源的性质和我国已有的 SR 实验站及其应用. 本文回顾了 SR 光源发展历史, 着重介绍了 SR 光源的性质和重要性.

## 2 SR 光源发展的历史回顾

1895 年 11 月 8 日, 德国科学家伦琴(Rontgen)发现 X 射线, 开创了科学技术的新纪元. 不久, Larmor(1897), Lienard(1897)和 Schott(1907)等人的出色工作, 奠定了加速运动带电粒子电磁辐射的经典理论基础. 他们的研究是在电子发现之后, 但却大大超前于粒子加速器的发展. 粒子加速器的研究开始于 20 世纪 20 年代, 但发展缓慢. 直至四五十年代, 物理学家应用同步加速器产生高能带电粒子, 并应用磁场把带电粒子限制在环形轨道内运动. 对于基本粒子物理实验所需要的高能量, 对撞前带电粒子的速度接近光速. 带电粒子加速期间, 能量损失的主要

\* 2001-10-23 收到初稿, 2001-12-12 修回

原因是电磁辐射,因此,20世纪40年代SR被认为是限制加速器达到高能量的主要障碍。

Blewett首先在电子加速器直接观察到SR后不久,Elder等人<sup>[3]</sup>在美国General Electric Laboratories的70MeV电子同步加速器上观察和研究了SR的性质,标志着SR光源新时代的开始。20世纪50年代,前苏联和美国的科学家都进行了大量实验,并与理论计算进行比较,60年代初开始了SR应用可行性的研究,使SR的应用很快进入了实用阶段。

理论和实验结果表明,SR光源具有常规光源不具备的异常优越的特征。关于SR光源的性质,我们将在下节讨论。

早期的同步加速器主要用于高能粒子物理研究,同步辐射光是其副产品。因此,SR光源的性质受到严重的影响,主要是亮度低,发散度大。如果SR实验与高能物理实验同时兼用,加速粒子能量随时间变化,因此,SR发射谱与时间有关。与高能物理实验共用一个同步加速器的SR装置称为第一代SR装置。在第一代SR装置上,SR实验有很大的发展,如高分辨X射线衍射、X射线光谱、X射线吸收谱、小晶体的结构分析、小角散射以及显微技术等,表明了SR光源的巨大优越性。

由于SR应用的迅速发展,第一代SR装置显然

不满足应用的需求,这就导致设计、建造和运行专门供SR应用的专门同步加速器。1968年,第一个专用于SR应用研究的同步加速器在美国Wisconsin的Tantalus建成,标志着第二代SR装置的开始,激发起世界范围内建造SR专用装置的热潮。到20世纪80年代中期,已有20个SR专用同步加速器在运行,还有若干个在建造。因为第二代SR装置是SR专用装置,故在加速器的设计上,从过去尽量使SR压抑到最小,到反过来要使SR获得最佳输出。因此,第二代SR光源具有高的亮度,小的发散度,更好地体现了SR光源的特点。

第一代和第二代SR光源的SR主要是从双极弯磁铁引出,后来人们利用多极磁铁来增加辐射光束的通量、亮度和辉度。因而,在第一代和第二代SR光源的储存环中也安装了插入件,以提高光源的品质。

SR应用的普及和发展,要求更高质量的SR光源,导致第三代SR光源的设计、建造和运行。第三代SR光源的最重要变化是在储存环的直线段设计、安装很多插入件,使SR光斑尺寸和发射度大大减小,光束的通量和亮度大大增加,其发射度小于10nmrad,亮度达 $10^6$ 量级,进一步提高了光源的性能。表1为三代SR光源性能的比较<sup>[4]</sup>。

表1 三代SR光源性能的比较

	通量	亮度	波长可调	洁净性	准直性	偏振性	脉冲性
第一代光源	✓	✓	✓	✓	✓	✓✓✓	
第二代光源	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓	红外、紫外	
第三代光源	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓✓	✓	✓

### 3 SR的基本性质

SR光源是一种新型光源,具有常规光源所不具备的特性<sup>[5]</sup>

#### 3.1 覆盖很宽的连续谱

对高能量的SR装置,其发射谱可以从红外波段到硬X射线,即波长从1—100nm。我们知道,原子、分子和蛋白质的尺度也在这长度范围内,而且化学键和晶体的原子间距也在这尺度范围。就是说,SR很适合用来研究固体、分子和生物体的结构。

另一方面,光子能量从几个eV到 $10^5$ eV,对应于原子、分子、固体和生物体中电子的束缚能,束缚电子包括:共价电子、化学键电子和蕊电子等,SR的

光子能量适合于检测上述电子及其化学键的性质。众所周知,原子分子、固体和生物体系统的电子性质的信息是理解它们物理和化学性质的关键。

SR连续谱的特征光子波长为

$$\lambda_c(\text{nm}) = \frac{1.865}{BE^2}, \quad (1)$$

其中B为双极子磁铁的磁场,E为电子能量。SR连续谱的峰值在 $0.7\lambda_c$ 处,绝大部分的辐射在 $0.2\lambda_c < \lambda < 10\lambda_c$ 之间。图1为BSRF从弯铁出射的SR光谱。可以看到,其光谱从紫外到硬X射线,为我们提供了一个非常宽广的波长选择范围。

#### 3.2 高亮度

在环形加速器内,电子被加速到光速,除了残留气体原子对电子散射外,能量的损耗只是SR。因此,

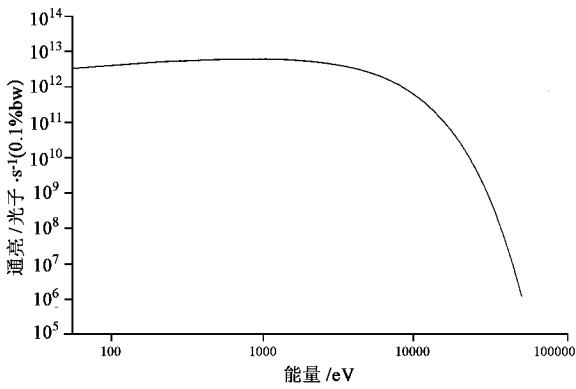


图1 BSRF从弯铁出射的SR光谱

从理论上讲,几乎全部输入的能量都转化为有用的SR.

辐射光束总能量表示为

$$P(\text{kW}) \cong 0.02654 E^3(\text{GeV}) B(\text{T}) I(\text{mA}), \quad (2)$$

其中  $I$  为电子束流. 可以看到, 辐射光束的能量强烈地依赖于电子束能量, 例如, 其他参数不变, 电子能量从  $1\text{GeV}$  到  $8\text{GeV}$ , 将使辐射光功率增加 500 多倍. 对  $E = 2\text{GeV}$ ,  $B = 1\text{T}$  和  $I = 100\text{mA}$ , 从(2)式可得  $P = 21.3\text{kW}$ .

光束亮度是  $0.1\%$  束宽内单位光源面积、单位出射立体角的通量. 它与电子束尺寸、角发散度和SR发散角分布有关. 由于SR发射谱的功率很高, 其亮度很高, 一般为  $10^{10} - 10^{14}$  光子  $\cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{mrad}^{-2} \cdot 0.1\%$  束宽 $^{-1}$ . 图2为不同X射线源亮度的比较. 可以看到, SR光源的亮度是常规X射线源不可比拟的.

### 3.3 高准直性

SR是沿着电子轨道切线方向以很小的立体角出射, 如图3所示. 从弯铁出射的SR的发散角  $\phi \sim \nu^{-1}$ ,  $\nu = E/mc^2$ . 例如, 对于  $\lambda = \lambda_c$ ,  $E = 2\text{GeV}$ ,  $\nu = 3.9 \times 10^3$ , 得  $\phi \sim 0.25\text{mrad}$ . 可见, SR光束的发散度约为  $\text{mrad}$  量级. 这是高度准直的光束, 其好处是 (1) 光源的面积小, 因而光束的通量高 (2) 准直性好, 可以使样品与探测器的距离增大, 因而可以在样品台上安装各种附加设备, 如环境室, 同时进行热处理、磁场、应力等实验.

### 3.4 偏振性

理论上, 单电子的SR光是在电子轨道平面方向  $100\%$  的线偏振, 一般情况下, 加速器是多电子束运行, 会使电子束在轨道每点上有发散, 造成偏振度降低, 但仍是高度偏振的光. 在轨道平面上, SR光是左旋或右旋的椭圆偏振. 如果应用垂直反射的扭摆器(wiggler), 还可以使偏振光沿垂直方向.

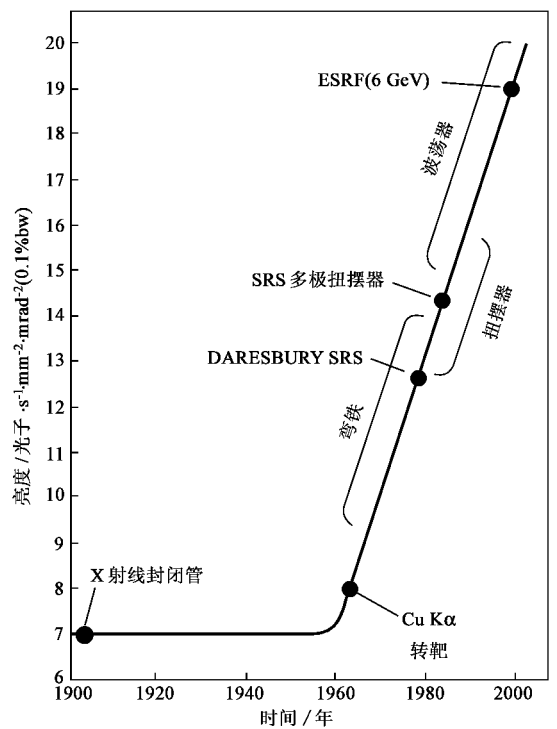


图2 不同X射线源亮度的比较

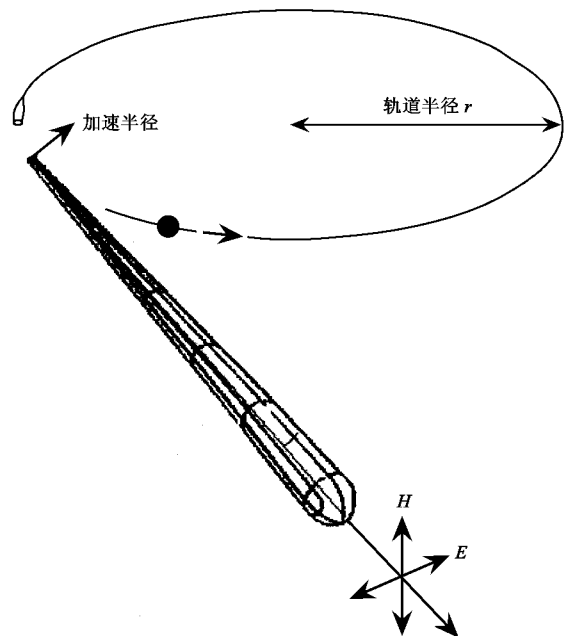


图3 SR发射立体角示意图

偏振性是SR光的一个重要特征, 对研究物质空间对称性谱学、晶体结构测定以及X射线光学十分有益.

### 3.5 时间结构

同步加速器的运行是一束一束电子输入储存环, 当电子经过储存环的光束线前端时, 就有一束SR光束线出射, 因此, SR光源是一种脉冲光源. 脉

冲时间为

$$\bar{L} \approx \frac{r}{c\nu^3}, \quad (3)$$

其中  $r$  为电子轨道半径,  $c$  为光速,  $\nu = E/mc^2$ . 由(3)式可知, 脉冲时间与电子能量有关. 一般为纳秒量级或更小.

SR 的时间结构提供了研究动态过程, 如化学反应, 生命运动, 材料结构相变等过程的可能性, SR 光源的这一特点在第三代 SR 光源体现更为充分.

### 3.6 清洁光源

同步加速器和光束线都保持在  $1.33 \times 10^{-7}$  Pa 以内的高真空, 因此, SR 光源是一种清洁光源.

## 4 SR 光源的改善

20 世纪 80 年代, SR 实验要求低发散度, 高亮度的光源, 导致 SR 光源的设计有明显的变化. 要增加从弯铁出来的辐射通量, 可以用增加光束水平孔径或增加储存环束流来达到. 然而更理想的设计是增加能同时聚焦到样品的光源点和减少电子束发射和光束发散度. 这就是在储存环两个极磁铁之间的直线段加入独立组元, 叫插入件.

有三种常用的插入件, 它们各有其功能.

第一种插入件是“波长移动器”(wavelength shifter)或“三极扭摆器”(three pole wiggler)【图 4(a)】. 这种插入件是最简单的. 它是一个中心两极磁铁工作在高磁场下, 而两边是两个半场的磁铁, 以保持电子束的位置和方向不变. 这种插入件的作用是减少特征波长  $\lambda_c$  值. 在英国 Daresbury SR 光源上, 1.2T 双极磁铁引出的 X 射线特征波长为  $\lambda_c = 0.4\text{nm}$ . 采用“三极扭摆器”磁场为 5T, 提供  $\lambda_c = 0.1\text{nm}$  高亮度的 X 射线, 为 X 射线衍射和 X 射线散射实验使用.

对于低浓度的样品分析, 需要高通量的 X 射线. 这就需要采用第二种插入件, 即多极扭摆器(multipole wiggler)【图 4(b)】. 它是沿插入的长度方向, 磁场交替改变其极性, 其结果相当于多组独立的双极磁铁. 一个  $n$  级的多极扭摆器辐射出  $n$  倍双极磁铁引出的通量, 而辐射立体角大约与双极磁铁相等.

第三种插入件是波荡器(undulator)【图 4(c)】. 波荡器的结构类似多极扭摆器, 但减少两极之间的缝隙. 在这种情况下, 电子在相对电子束方向做横向振荡, 其辐射波长决定于两极间的缝隙, 辐射沿向前方向, 并且呈单色. 这种元件可使辐射 X 射线亮

度大幅度提高. 由于多普勒效应, 辐射的 SR 光波长偏离  $\lambda_c$ . 波荡器每个磁场周期产生一束辐射光, 其波长大约为  $\frac{\lambda_c}{2nr^2}$ , 其中  $n$  为整数.

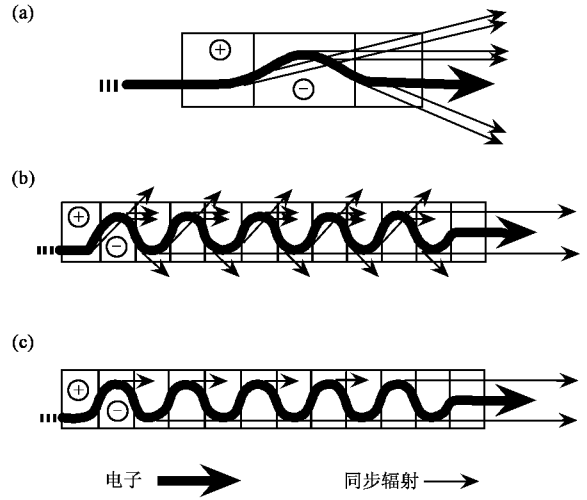


图 4 不同类型的插入件  
(a)三极扭摆器 (b)多极扭摆器 (c)波荡器

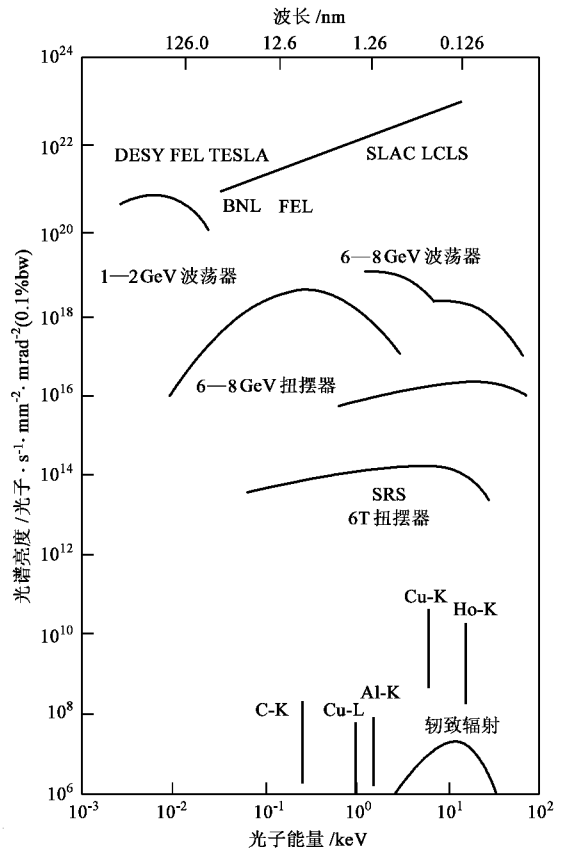


图 5 不同插入件输出的光谱亮度比较

对所有的插入件, 辐射光斑的情况不仅决定于光束的发射度, 而且还决定于电子束的角发射. 对于

很长的插入件(例如 10—20m),由于磁铁缝隙很小,因而,要求储存环电子束的发散度很小,以保证电子束通过插入件时不丢束.目前,已可以设计和建造很小发散度的储存环,其电子束发散可达  $10^{-9}$  mrad 量级.在某种程度上,它导致周长长达数千米的储存环诞生.

细电子束结合波荡器技术可以减小光束发散度,这可使 SR 光亮度比 20 世纪 80 年代初从弯铁出射的光亮度高  $10^6$  倍.图 5 为不同插入件输出的光谱亮度与常规 X 射线光源比较.

出射光的相干性是 SR 光源性质的一个重要参数.通过改善长插入件磁场的均匀性来改善相干性是近期新建储存环的设计思想.改善相干性的另一个途径是在储存环或电子直线加速器建造自由电子激光装置(free electron laser device, FEL),也就是由穿越光学腔和扭摆器扰动的自由电子受激发射. SR 和激光技术结合,大大推进了 FEL 系统的发展,是 SR 光源发展的一个方向.作为例子,德国汉堡 DESY 提出建造一个自放大、自发射 FEL,它由超导线性加速器和纵向束压缩器增强,运行能量为 1GeV,将使光谱亮度在 1% 束宽内达到  $10^{22}$  光子  $\cdot$  s $^{-1}$   $\cdot$  mm $^{-2}$   $\cdot$  mrad $^{-2}$ .这是几年前不可想像的.因此,也有人称 FEL 为第四代光源.

## 5 SR 的重要性

关于 SR 的具体应用,在本讲座系列的各讲中都有详细论述,本文只就 SR 应用的重要性作简要综述.

由于 SR 光源的独特性能,SR 的应用给予科学技术发展提供了一个新的实验平台和一种新的途径.常规光源认为不可能做的实验,现在成为可能,而且还发展了很多新的技术和新方法.现在 SR 应用已被广泛认为是几乎所有学科不可缺少的分析工具.用户数目不断增长,图 6 为 BSRF 研究课题数目.根据美国 BESAC 报告,1998 年美国的 SR 用户数增加了 16%,工业界对 SR 应用的兴趣也越来越浓厚.可以看出,随着 SR 光源的增强和实验方法及实验装置的发展,SR 应用已扩展到几乎所有科学研究和工业生产各领域.好多国家认为,SR 的应用对他们国家的科学和工业的发展有重要的战略意义,下面简要介绍 SR 在生命科学、材料科学、原子分子科学、地球科学和环境科学以及工业等领域中的应用.

### 5.1 生命科学

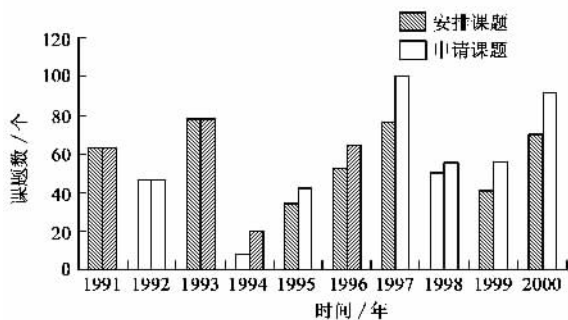


图 6 BSRF 研究课题数目



生命科学是世纪之交发展最迅速的学科之一,SR 已成为生命科学发展的关键手段.目前,世界上 SR 用户总数的三分之一来自生命科学,已建成的用于生命科学的专用光束线站有 50 多条.使人们想起 20 世纪 30 年代,英国 J. C. Kendrew 和 M. F. Perutz 应用 X 射线衍射分析方法测定肌红蛋白和血红蛋白晶体结构,延续了二十多年,牵涉为数众多的科学家,终于在 1959 年测定出来.作为这项工作的代表人物,他们荣获了 1962 年诺贝尔化学奖.目前,每年被测定的蛋白质结构,有 90% 是应用 SR 完成的!

生命科学一个重要的任务是寻找生物体结构、组织与功能的关系.随着人类基因组计划的顺利完成,结构基因组学是当前生命科学的一个前沿领域.结构基因组研究对于生命科学研究、生物工程发展和新药开发的重大影响将大大超过人类基因组计划.而要成为结构基因组学国际联合研究组织成员的一个条件是,必须具有 SR 测定生物大分子结构的装置.除了高分辨 X 射线衍射技术外,SR 还可以提供多种实验技术,用于生命的研究.例如,紫外显微技术和荧光光谱相结合,可以观察生物细胞的三维图像.EXAFS 可以研究蛋白质近邻结构和酶产生功能的位置.利用 SR 可调波长和时间结构特性,可研究纳秒时间分辨的蛋白质分子运动学过程.SR 微束技术可以研究细胞内的活动.

### 5.2 材料科学

材料科学是众多学科的基础,与工业应用和日常生活密切相关.对于材料结构的研究,通常应用与光子和中子相关的技术.SR 光源是高亮度、连续谱的光子源.目前,世界上 SR 装置约有 40%—50% 线束用于材料科学的研究.研究方法向着高空间分辨、高时间分辨和高能量分辨的方向发展.2000 年 BSRF 的研究课题,材料科学占 42%.现有的 SR 装置各实验站提供了测定材料化学组分、晶体结构、电子结

构、痕量元素、表面化学和电学性质等实验手段。可以说,SR装置是材料科学研究的一个必不可缺少的重要的实验手段。

### 5.3 原子分子科学

原子分子科学主要研究不同量子状态和激发态下的动力学过程,实验要求光源强,探测系统灵敏度高,并在真空环境下进行。由于实验条件要求高,很多实验在常规光源下难以进行,SR装置提供了实验的可能性。目前,原子分子科学研究约占世界主要SR装置机时的10%—15%,大部分是紫外/真空紫外光谱实验。主要研究领域有光吸收、光离子化、光分解、时间分辨荧光等。这里需要特别指出的是,近年来,SR与激光技术结合研究分子动态过程是一个值得重视的动向。其实验方法是利用激光分解分子,然后应用SR研究分子分解过程,或者利用SR使分子离子化,然后应用激光研究离子化过程。

### 5.4 地球科学

地球科学一个重要部分是研究地球以及地球各种矿藏资源的形成和利用规律。可以说SR装置所有现有的实验技术都可应用于地球科学的研究,如矿物化学组分、晶体结构和电子结构的测定。特别指出的是,SR光源高温高压X射线衍射技术可模拟地球深处情况。X射线微探针分析可以达到几微米的空间分辨率,元素探测灵敏度达 $10^{-10}$ 量级。我国科学工作者已应用微探针技术研究微米尺度矿物包裹体,对成矿理论提供重要数据。同时,对我国第一口超深井的岩样表示关注,并从多学科角度研究不同地质深度物质成分剖面、化学元素剖面及微生物剖面。

### 5.5 环境科学

环境科学是一门新生的学科,在我国的发展方兴未艾。随着经济的发展,人们对环境的保护越来越重视。SR应用于环境科学也逐年增多,SR光源具有微区、高灵敏度、低检测限、无损探测等特点,如SR微束技术中微探针、微束X射线衍射和微束吸收谱等技术都是环境科学研究的有力工具。美国应用SR研究环境污染已取得了一批重要的结果,包括受重金属和放射性污染的土壤的处理以及受真菌疾病侵害的植物的防治。可喜的是,我国科学工作者已应用SR研究淮河流域植物的污染以及南极冰样分析,取得了可喜的结果,迈出了SR在环境科学中应用的第一步。

### 5.6 工业应用

随着SR光源的改善和实验方法的发展,SR在

工业很多领域的应用成为可能,如材料结构测定、化学分析、催化研究、新药研制和加工新技术等。美国的NSLS有15条光束线和实验站是由工业界建造,占光束线总数的15%。在美国的ALS,工业界的专用束线占25%。英国的Daresburg有20%的机时是供工业界应用的。韩国的Pohong Light Source是一台有竞争性的第三代SR光源,其建造经费的60%来源于Pohang钢铁公司。在国外的SR装置,工业界都拥有自己的光束线和实验站,他们的研究活动也是封闭的。

最早的SR工业应用是半导体器件的光刻工艺和微加工LIGA工艺。为了适应微加工工艺的需求,设计和建造了小型专用的SR光源,储存环只有几米,并且已经商品化,使SR光源在工业和医学方面的应用更加方便、灵活。

几年前,中国工程物理研究院与BSRF共建了一条软X射线束线,主要用于软X射线标定研究。最近,又决定在近期内再共建一条中能量软X射线束线。我们期待,有更多的工业界在中国,甚至在外国的SR装置上建造自己的束线和实验站。

SR光源近期的发展动向(1)小束斑、低发散度、超亮度光源,这样的装置可能应用于FEL技术,从亚微米尺度的任何物质获得更多的信息(2)为特殊用途而设计、建造的专用小型SR光源,称为table-top synchrotron source,用于微电子工业或医疗诊断;(3)宽能量范围、高空间和时间分辨、高探测效率的新型探测器,它不仅能使目前的研究水平大大提高,而且还可能发展新的实验技术。

SR装置是一个耗资巨大的大科学工程,是几乎包括所有学科领域的实验平台。它的建造体现了国家科学技术发展,体现了国家综合国力和工业水平,已经引起了发达国家和发展中国家的高度重视。我们相信,我国的SR装置对我国四个现代化建设将起越来越重要的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Blewett J P. Phys. Rev. 1946 69 87
- [2] Larmor J. Phil. Mag. 1897 44 :503 ;Lienard A,Edairage L. Electr. 1898 16 5 ;Schott G A. Ann. Phys.(Leipzig) 1907 24 635
- [3] Elder F R ,Gurewitsch A M ,Langmuir R V *et al.* Phys. Rev. , 1947 71 829
- [4] 洗鼎昌.全国青年学者同步辐射研讨会.2000年,合肥 Xian D C. National symposium of young scientists on the applications of synchrotron radiation.2000,Hefe( in Chinese )]
- [5] Margariton G. Introduction to Synchrotron Radiation. Oxford :Oxford University Press ,1988