

BSRF的10年展望

1. 目前国际上同步辐射装置发展的态势。

1968年世界上第一台用作同步辐射光源的贮存环美国 Wisconsin 大学的 Tantalus ($E=200\text{MeV}$) 投入运行, 1970 年第一台

专用的同步辐射光源, 日本东京大学的 SOR-Ring 问世。事隔 20 年后的今天, 已有 14 个国家, 43 座装置正在建造或者已经投入运行。从光源的特性来说已经从第一代发展到了第三代。表 3 列举几台目前世界上运行或即将建成出束的同步辐射装置的一些性能, 亚洲地区的南朝鲜正在建造能量为 2.0GeV 的第三代同步辐射装置 PLS, 台湾地区也正在建造能量为 1.3GeV 的第三代同步辐射装置 SRRC。由此看出: 70 年代建成的同步辐射装置多数为兼用机, 发射度较大 ($10^2\sim 10^3\text{nm}\cdot\text{rad}$) 可放置插入件的直线节较少。到 80 年代中期, 建成的同步辐射装置多数为专用机, 发射度较小 ($10\sim 10^2\text{nm}\cdot\text{rad}$), 可放置插入件的直线节较多。加上多极扭摆磁铁后, 亮度 (Brilliance) 提高到 $10^{13}\sim 10^{14}$, 通常称之为第二代同步辐射光源。随着同步辐射技术水平的不断提高, 到 90 年代前期, 将建成一批第三代同步辐射光源, 它们是专用机, 具有更小的发射度 ($1\sim 10\text{nm}\cdot\text{rad}$) 和多个长直线节, 可安放多周期的波荡器, 亮度将增加到 $10^{17}\sim 10^{19}$ 。从能区来看, 高能电子的能量大致集中在三个能区 ($0.8\text{GeV}, 1.5\sim 2.5\text{GeV}, 6\sim 8\text{GeV}$), 相应的同步辐射主要工作在 VUV, X 射线以及硬 X 射线波段范围。BSRF 从其兼用机来说只能属第一代光源, 在专用模式下, 其性能已达到或接近于第二代。

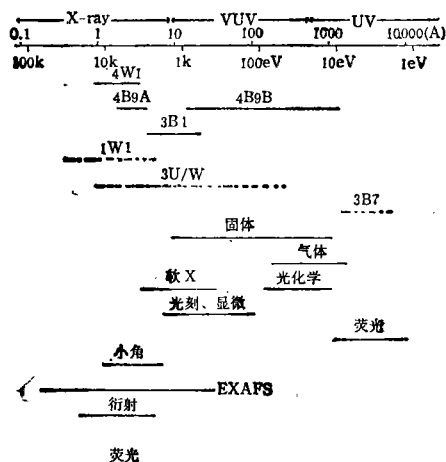


图3 光束线的能区分布及可能的实验范畴

· 高科技博览 · 学部委员朱洪元教授主持 ·

北京同步辐射装置

十年回顾与十年展望 (下)

· 唐鄂生 ·



2. BSRF“八五”期间的发展规划

根据同步辐射的这种发展态势和 BEPC 的现实情况以及科学前沿发展和应用的需要, BSRF 第二期工程的规划设计中加强了直线节的利用和插入件的开发。拟新建的三条光束线中, 有两条来自多极永磁扭摆磁铁和波荡器, 另一条是宽引出角的弯铁束线。其特点:

① 亮度增高。

新建的扭摆磁铁为 6 极永磁扭摆磁铁, 直线节长度为 1.74m 采用变孔径超高真空腔 (内径 $20\sim 36\text{mm}$ 内可调) 磁铁间隙在 $24\sim 200\text{mm}$ 范围内可调。扭摆磁铁光源的特征能量 $E\approx 9.38\text{keV}$, 亮度为 1.5×10^{14} , 比 4 W1 的光源亮度增加 10 倍。新建的波荡器, 直线节长度为 1.67m , 周期长度 10cm , 周期数 15。它具有两种工作模式, 在大气隙弱磁场 (0.38T) 条件下为波荡器模式, 其基波, 三次波的能量范围, 分别为 $e_1=50\sim 530\text{eV}$, $e_3=0.5\sim 1.6\text{keV}$, 500eV 时的亮度 (Brilliance) $\approx 1.5\times 10^{14}$, 较 B 铁增加 500 倍。当气隙为 24mm 时, 最大磁场强度为 0.96T , 此时为扭摆磁铁模式, 特征能量 $E\approx 5.0\text{keV}$, Brilliance $\approx 4.4\times 10^{14}$, 比 4 W1 增加 15 倍。由于采用了插入件而使束线成为高亮度束线。

② 能量覆盖范围加宽。

新建光源及束线的设计原则建立在 BEPC 专用模式下的工作状态, $E=2.8\text{GeV}$, $I=100\text{mA}$ 。对扭摆磁铁束线, 高端截止能量可以拓宽到 $\sim 45\text{keV}$, 足以激发到 $Z=60$ 以内的所有元素的 K 激发边以及全部元素的 L 激发边, 低端延伸到真空紫外以及可见光。从而可以满足多种学科的需要。

③ 均为聚焦束线。

微束技术将是今后同步辐射光束线发展的重要方向之一。利用大的接受张角并聚焦, 可以使光通量增加 10 倍甚至更多。例如微探针荧光分析技术, 微束 CT, 软 X 显微术, 软 X 光刻技术, 软 X 微加工技术以及显微能谱学等, 都需要微束技术。

④ 热负荷的挑战。

由于采用了插入件及强聚焦技术, 光束线的高功率以及高功率密度在光学器件上产生的热负荷将是一

个严峻的问题。例如在新建扭摆磁铁束线上产生的功率密度可以高达 300 W/mrad, 它会引起光学元件变

$10^{-9}\text{m}\cdot\text{rad}$, 可用直线节 10 个。日本 SPRing-8, 其能量为 8 GeV, $5 \times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{rad}$, 有直线节 40 个, 这些

表 3 不同时期建成的某些同步辐射装置的特点

	出束时间	贮存环	能量 [GeV]	发射度 (H/V) [$\times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{rad}$]	Brilliance	模式
第一代兼用型	1973	SPEAR (美)	3.0—3.5	440/40	5×10^{12}	寄生
	1981	DORIS II (德)	3.5—5.5	270/8	1.5×10^{13}	寄生
	1989	BEPC (中)	1.6—2.2	70/7	3×10^{13}	寄生
第二代专用型	1982	NLS II (美)	2.5	80/0.8	15×10^{14}	专用
	1982	PF (日)	2.5	130/2.3	2×10^{13}	专用
		HESYRL (中)	0.8	26/2.6		专用
第三代专用多直线节低发射度	1992	ALS (美)	1.5	3.4/0.34	10^{19}	专用
	1993	ESRF (欧)	6.0	6.0/0.60	4×10^{18}	专用
	1995	APS (美)	7.0	7.0/0.11		专用

形,甚至破坏,因而热负载的计算,冷却措施的完善等将是设计中必须认真对待的问题。

⑤ 与三条高亮度束线相对应的实验工作可以开展要求极端条件(超高压、高温、低密度、微区)下的各学科前沿工作,对于高压高温/高压低温实验、分子水平上的生命科学、原子和分子物理学、X光微区荧光分析和软 X 光学等研究工作极为重要,这些都是当前国际上科技发展的前沿领域,与国民经济及高技术发展关系极为密切。

“八五”期间新建的束线及实验站的配置如表 4 所示。

3. BSRF“九五”期间的展望。

BSRF“八五”计划预计在 1994 年出光,1995 年线站联通,投入试运行,到那时将有 12 条束线或分束线,~15 个实验站可以在专用模式下同时工作,但即便如此,在 SR 光源的数量和质量来说,比起国外那时将已经建成的第三代同步辐射装置仍有较大的差距,同时由于 BSRF 是一台兼用机,发射度、流强以及 SR 的专用机时都受到一定限制,难以满足日益增长的用户的需求,我们希望在“九五”期间在高能所建造第三代的专用同步辐射光源。

① 第三代光源的特点

第三代 SR 光源是低发射度,多直线节的专用同步辐射光源,例如欧洲共同体在法国建造的 ESRF, $E = 6\text{GeV}$, 其发射度仅 $7 \times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{rad}$, 有可用直线节 11 个。美国 LBL 的 ALS, 能量与发散度分别为 1.5 GeV, $7 \times$

环都正在设计建造,预计 90 年代中期应可投入使用。

② 在高能所建造第三代同步辐射光源有许多有利条件:

A. 高能所通过 BEPC 的建造与提高及 BSRF 两期 SR 工程建设,将积累大量的加速器和同步辐射装置的建设经验,并且培育出一支高水准的能够顽强拼搏的科研工程队伍。

B. 第三代同步辐射加速器通常采用正电子来产生同步辐射,因为它可以克服负电子的正离子或分子的俘获效应,而使获得更稳定,寿命更长的同步光。BEPC 已有一台正电子注入器,可以提供能量为 1.0—1.5 GeV 的正电子束,正符合第三代同步辐射装置全能量正电子注入的要求,从而可以较少投资而得到具有先进水平的装置。

C. 建议建造 1.5 GeV 的 SR 装置,该贮存环周长 150 米,平均直径 50 米,再加上周围的 SR 实验室,

表 4 新建束线主要特性

	1W1	3U/W	3B7
前端			
磁场 [T]	1.8	0.38 0.96	0.9
间隙 [cm]	2.6—3.6	5.8 2.6	—
周期长度 [cm]	25.6	10 10	—
周期数	6	15 15	—
临界能量 [keV]	9.38	$\theta_1 = 0.1—0.74$ 5.0	4.7
偏转系数 K	42.7	$\theta_2 = 0.3—2.2$ 3.6 8.9	—
光源大小			
σ_x [mm]	0.72	0.84	0.69
σ_x' [mrad]	0.16	0.2	0.31
σ_y [mm]	0.24	0.18	0.22
σ_y' [mrad]	0.043	0.050	0.057
功率密度 [W/mrad]	300	108 274	8.6
接受张角 [mrad]	$4 \times 0.2(H \times V)$	3×0.2	15×0.5
光子能量 [keV]	2.8—37	0.05—1 1—14	1500—8000 A
光源光子通量 [p/s · mr · 0.1%BW]	8×10^{13}	2×10^{14}	1×10^{19}
镜子	压弯柱面	压弯柱面	球面
单色器	双平晶	光栅,双平晶	光栅
能量分辨	10^{-4}	$10^{-2} 10^{-4}$	2.5×10^{-3}
光斑尺寸 [mm ²]	0.3×0.1		2.2×1.1
实验装置	超高压衍射	原子分子物理	时间荧光
	微束扫描荧光	软 X 光学	计量刻度
	核共振散射		SR 特性研究

80年代中期，联邦德国和美国的一些材料科学家们在实验室里首先制造出了一种新型的固体材料。它是由

尺寸仅为几个纳米(10^{-9} 米)的超细微粒压制而成的人工凝聚态固体，通常称之为纳米固体材料或纳米尺度材料。对这种材料的研究发现，它具有全新的“类气态”(gas-like)结构，性能十分奇特。如纳米固体铁的断裂应力比常规铁材料一下子提高了近12倍；纳米固体铜又比一般铜材料的热扩散增强了近一倍。更为奇怪的是，普通状态下呈脆性的陶瓷，在纳米固体材料中却能被弯曲，其塑性形变竟然高达100%。这使得长期为增强陶瓷韧性而费尽心血的科学工作者们大为振奋。纳米固体材料的一系列特性，引起了科学家们的浓厚兴趣，并积极开展了对这种材料的结构特点、制造方法、特性和应用的研究。

到1989年，纳米固体研究的种类，已从晶态微粒制成的纳米晶体材料——纳米导体(金属、合金)、纳米绝缘体(无机化合物)和纳米半导体，发展到纳米非晶材料。并成功地制造出一些性能异常的复合纳米固体材料。值得注意的是，来自太空的陨石和海底的锰结核中，都有超细微粒成分。我国学者还发现，人和动物的牙齿之所以特别坚硬，也与构成它们的物质是纳米尺度的超细微粒密切相关。从而揭示了纳米固体这种特殊结构的凝聚态物质，同样存在于生物体乃至自然界之中。目前各国对纳米固体的研究仍方兴未艾，所取得的进展已被认为是近年来材料科学最重要的新成就之一，它使凝聚态物理的发展出现了新的趋势。

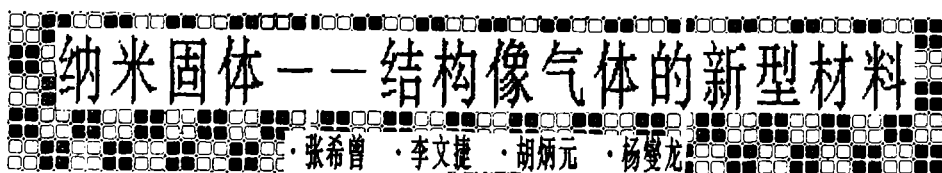
一、纳米固体的结构特点：

通常的固体材料，以构成它们的原子、分子结构的有序性为特征，可分为晶态和非晶态。在晶态固体材料的内部，原子在很大的范围内保持有规则、有次序的排列，称其具有长程有序结构；而非晶态固体材料的内

刚好能安置在高能所 BEPC 附近的 $80 \times 80 \text{ m}^2$ 的空地上，毋需另外征地，不仅可以节省投资而且可以缩短建设周期。该装置发射度小于 $8 \times 10^{-9} \text{ m-rad}$ ，可利用的直线节有 7 个与 ALS 相当。

③ 1.5 GeV 能区的选择及可供开展的物理工作

1.5 GeV 电子贮存环是提供 X 和远紫外光的最理想的光源装置，从弯铁引出的同步辐射基本分布在 $10 \text{ eV} - 10 \text{ keV}$ 。如果加入超导扭摆磁铁，可将高能端延伸到 30 keV ，足以激发许多有兴趣的重要元素的 K 边与 L 边。如果从波荡器引出，可以获得高亮度的相干光。第三代 1.5 GeV 专用同步辐射储存环的建立，对原子分子物理、生物医学、化学动力学、材料科学、界面物



部，原子的排列方式仅在几个原子距离的所谓近程范围内才呈有规则排列，称之为短程有序或近程有序结构。用透视电子显微镜、X 射线衍射、正电子湮没及穆斯堡尔谱等方法对纳米固体的结构所作的研究表明，这类材料是由两种不同的原子组态所构成：一种是具有纳米尺度的颗粒，称为颗粒组元；另一种是这些颗粒之间的分界面，称为界面组元。

下图是由纳米尺度的晶态颗粒压制成的纳米固体材料的示意图。图中黑圆点代表晶粒内原子，白圈代表界面中的原子。箭头表示出界面 A 和界面 B 中不同的原子间距。由于界面的原子结构是取决于相邻晶粒间的配位关系、分界线的倾角以及原子间的相互作用力等参数，如果这些参数中有一个不相同，就将构成一种新的界面结构。而在这种由大量超细微粒压制成型的纳米固体材料中，各晶粒的取向是随机的，所以，它们构成的各个界面之间都将具有不相同的原子结构，这些结构可由不同的原子间距加以区分。如图中所示，界面 A 和界面 B 内箭头所表示的原子之间的距离，显然都是大小不一，指向各异。同时，由于组成纳米固体的颗粒极小，又使得界面组元所占的比重大大增加。

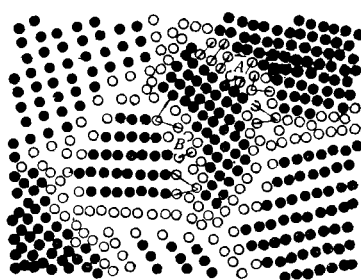


图 纳米微晶的结构示意图。图上界面原子仍位于规则晶格位置上，但实际的纳米微晶中这些原子将松弛而形成不同的原子排列

理、表面科学、软 X 光学等基础学科，以及工业研究和 技术、超大规模集成组件的研制、超微细结构的加工技术等高科技学科带来巨大的变革。

结 束 语

回顾过去，展望未来，我们充满着信心。今天我们已经拥有一台 $E = 2.8 \text{ GeV}$ 的高能贮存环，用以提供硬 X 射线的同步辐射光。十年后的今天，到 2000 年，我们希望再拥有一台性能更为优异的用以提供 X 射线，软 X 射线，VUV 光源的第三代同步辐射装置，为更多的学科提供服务，使未来的科学中心成为人才辈出、硕果累累的科学园地。