

日本的同步辐射实验室

陈星旦 李云硕

摘要: 日本有四个同步辐射实验室。作者于1984年3~6月及10月分别访问了这些实验室。本文介绍了它们的发展历史, 光束线布置、单色仪以及作为对外开放实验室的一般情况。

日本是国际上开展同步辐射研究最早的几个国家之一。远在1962年, 东京核研究所就开始用它的750MeV电子同步加速器进行光谱研究。1965年以后, 陆续发表了利用同步辐射进行固体和气体吸收光谱研究的结果。日本第一台专用同步辐射装置始建于1970年, 至1975年建成。这就是东京大学物性研究所的SOR-RING。其后, 根据不同使用目的, 又相继建造了几个专用同步辐射装置。目前日本共有四台不同大小的装置在运转使用中。这些装置的名称及规模如表1。

表1 日本的同步辐射装置

装置名称	所在地	E (GeV)	s_c (KeV)	建成年代	窗口*	实验站*
SOR-RING (INS-SOR II)	东京大学物性研究所	0.4	0.13	1975	4	6
ETL	电子技术综合研究所	0.66	0.32	1981	4(12)	4(36)
Photon Factory	高能物理研究所	2.5	4.00	1982	9(21)	27
UV-SOR	分子科学研究所	0.6	0.22	1984	8	13(32)

* 括弧内为计划中的数字

作者于1984年3~6月及10月先后访问了上述四个实验室, 分别在高能物理研究所和分子科学研究所逗留较长时间。这两个实验室的规模和我国正在兴建的北京、合肥两个实验室相当。本文择要介绍其有关方面。

历史梗概

六十年代, 国际上的同步辐射研究, 都是利用当时作高能物理研究的电子同步加速器进行的。至七十年代, 才开始建造电子贮存环作同步辐射专用。日本同步辐射装置的发展历史也是这样, 并且一直处于国际先进行列。七十年代初, 日本就同时计划建造几个不同用途、不同能量的电子贮存环。

在建造SOR-RING的差不多同时, 日本学术界就酝酿建造更大的同步辐射装置。1971年底, 在东京大学应用物理系从事X光学和加速器物理的科学家之间, 就开始倡议建造一个电子贮存环作为强X光源。1973年4月, 成立了一个叫“Photon Factory”的民间组织, 以促进这项倡议的实现。成员包括许多领域的科学家。经过多番努力, 至1977年, 政府正式批准在高能物理研究所(筑波)建造一个2.5GeV电子直线加速器和一个2.5GeV电子贮存环的最后计划, 1978年拨给经费183亿日元(约2亿人民币)。第二年1月破土动工。只经过三年多的时间, 至1982年3月出光。当年建成13条光束线。1983年9月, 23条光束线开始工作。

UV-SOR的建设也有相似的历史。早在分子科学研究所(冈崎)建所的同时(1974年),就开始计划建造一个产生紫外和真空紫外辐射的贮存环,以进行分子科学的研究。他们的做法不同于其他实验室,是先开始(1980年)研制各类单色仪和实验仪器,然后(1981年)开始加速器的主体建设。由于他们考虑到了实验仪器的研制周期,同时吸取了其他实验室的经验,因此只用了两年多的时间。至1983年11月,加速器和贮存环试运转成功,1984年8条光束线就可以同时交付使用。

这两个同步辐射实验室的建设,从破土动工到交付使用,大约都只用了三年左右的时间。速度如此之快由于东京大学SOR-RING的建设经验起了很大作用。目前在Photon Factory和UV-SOR的工作人员,有不少是过去在SOR-RING工作过的科学家和工程师。

光束线

Photon Factory至1983年9月底,总共建造了九条主光束线。包括三条X线光束线(BL-4, 10, 15),两条真空紫外光束线(BL-11, 12),一条wiggler线(BL-14),一条undulator线(BL-2),一条光刻线(BL-1),一条监控贮存环工作状态的线(BL-21)。这九条主光束线,除undulator线和监控线外,每条光束线都再分为三至四条支线,总计23条光束线。光束线的分布如图1。这些光束线的设计始于1980年,都是根据1979年用户委员会一次提出来的要求确定的。其中光束线BL-1,是日本电报电话公司(NTT)和高能物理所(KEK)共同合作进行建设,专用于X线显微光刻和有关材料研究。主要由NTT投资。建成后,一半工作时间由NTT使用,另一半通过KEK提供一般用户使用。该光束线将分为三条支线,其中两条已建成,另一条在建设中。这些光束线的基本参数、主要用途列于表2及表3。

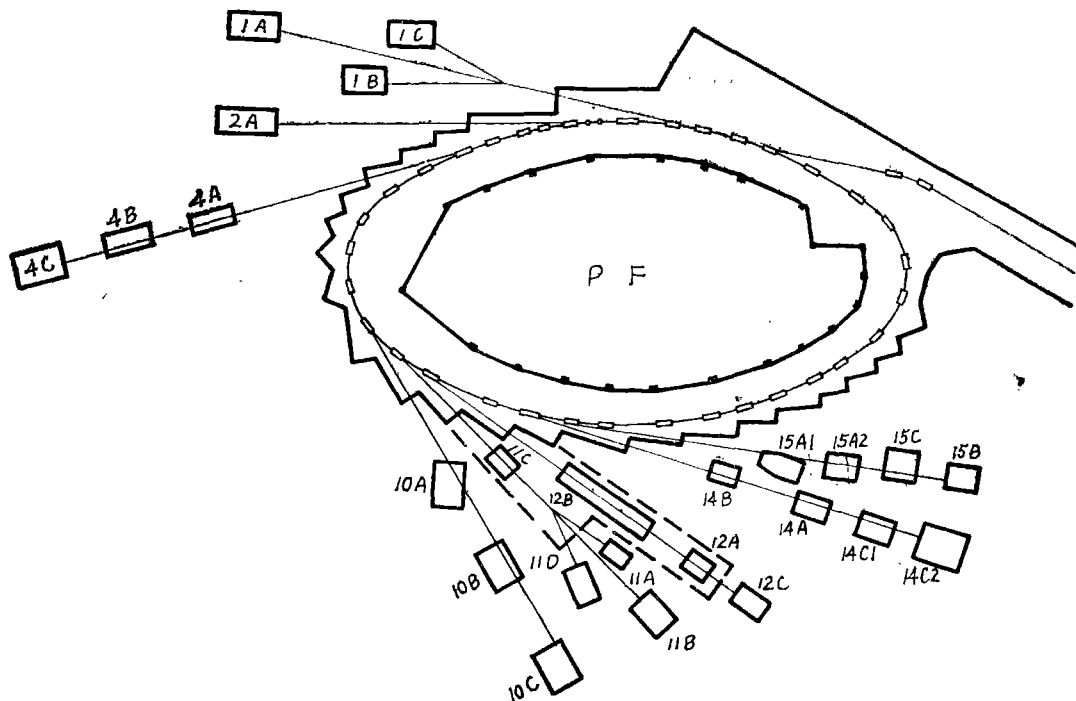


图1 Photon Factory光束线分布

表2 Photon Factory真空紫外/软X线光束线

光束线编号	发射角 (水平×垂直) (mrad×mrad)	光点大小 (水平×垂直) (mm×mm)	单色仪	分辨率 (nm)	波长范围 (nm)	主要用途
1B	1×4	φ19	滤光片	—	软X线	X光刻
1C	2×4	2×10	"	—	真空紫外/软X线	光化学反应
2A	φ0.7	φ2	undulator	—	0.5—3	气相光电子谱
11A	1.3×0.4	8×0.3	蚱蜢, 二米掠入射	0.4	1—24	软X线固体光谱
11B	4×1	—	双晶	1eV	0.3—0.6	表面EXAFS
11C	4.8×3	—	濂谷-波冈, 1m正入射	$\lambda/\Delta\lambda\sim 3000$	40—300	真空紫外固体光谱
11D	2×2	0.5×0.5	恒偏角, 2m掠入射	$\lambda/\Delta\lambda\sim 1500$	3—60	角分辨固体光电子谱
12A	2.4×1.5	φ1	濂谷-波冈, 1m正入射	0.02 at 50nm	35—150	真空紫外气体光谱
12B	5×1.5	—	6.65m正入射	0.0003 at 50nm	40—250	真空紫外高分辨率气体光谱
12C	0.14×0.4	—	10m掠入射	0.0002	0.6—5	软X线高分辨率气体光谱

表3 Photon Factory X线光束线

光束线编号	最大水平发射角 (mrad)	光点大小 (水平×垂直) (mm×mm)	单色仪	能量分辨率 ($\Delta E/E$)	能量范围 (keV)	主要用途
4A	6	50×5	—	—	4—35	荧光分析
4B	4.5	50×5	—	—	4—35	液体和气体衍射
4C	6	50×5	—	—	4—35	高压和低温X线衍射
10A	1	10×3	Si(111), Ge(111)	$5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$	6.5—25	结构分析
10B	2	20×1	双晶Si(111), (220), (311)	1×10^{-4}	4—30	EXAFS和XANES
10C	4	6×1.5	双晶, Si(111)	2×10^{-4}	4—10	X线散射
14A	1.3	10×38	双晶, Si(111)等	2×10^{-4}	5.2—57	结构分析
14B	2.2	5×30	双晶Si(111), (220), (311)	2×10^{-4}	6—60	精细X光学
14C	1.3	5×50	双晶, Si(111)	2×10^{-4}	5.5—43	X线形貌X线医学诊断
15A	2	2.6×1.3	弯晶, Si(111) ($\alpha = 7.8^\circ$)	10^{-3}	6.8 (固定)	X线小角度散射
15B	1	30×6	—	—	4—35	X线形貌, X线干涉
15C	2	60×6	—	—	4—35	高分辨率X线衍射

UV-SOR光束线的分布见图2，主要参数见表4。

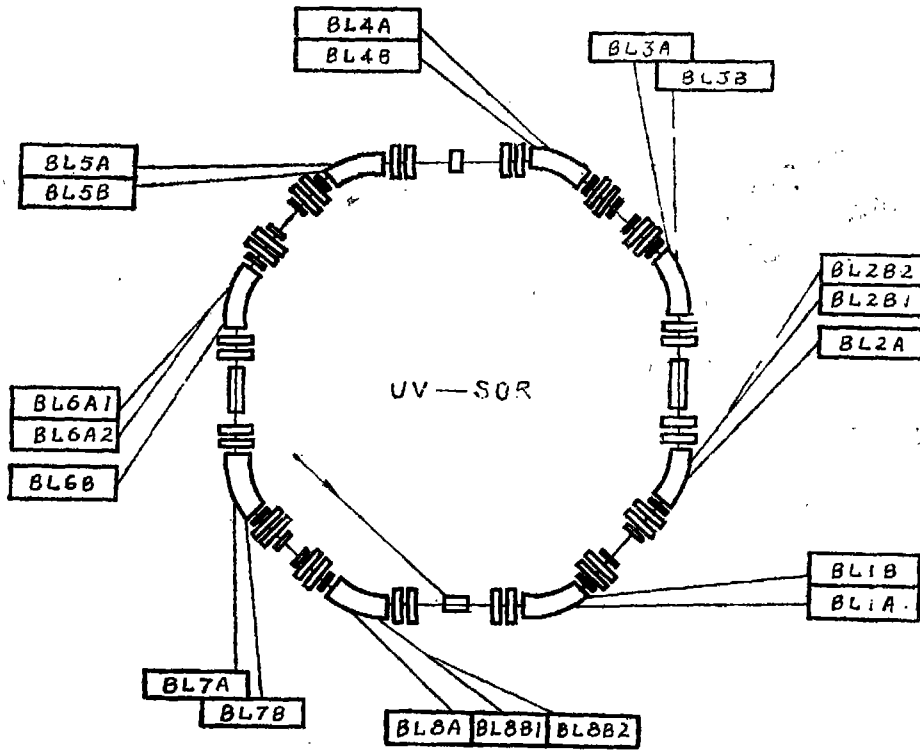


图2 UV-SOR光束线分布

表4 UV-SOR光束线

光束线编号	发射角 (mrad)	光点大小 (mm×mm)	单色仪	分辨率 (nm)	波长范围 (nm)
1B	60	1.8×1.8	1m 濂谷-波冈		30—200
2A	40	1×1	"	0.1—1	"
2B1	10	—	2.2m 罗兰掠入射	0.07eV	2—20
2B2	20	0.5×0.5	1m 濂谷-波冈	0.07—0.1	30—150
3A	<10	0.4×0.4	恒偏角掠入射	0.004	12—120
3B	20	1×1	3m 正入射	0.0003	40—300
6A1	60		远红外傅里叶干涉仪		1—1000 μm
6A2	10	1×1.5	平面光栅	0.1eV	10—200
7A	>10		双晶		0.3—2
7B	50	0.5×1.5	1m 濂谷-波冈	0.02	30—200
8B1	10		2.2m 罗兰掠入射	0.07eV	2—20
8B2	10	1×1.5	平面光栅	0.1eV	30—200

单色仪

Photon Factory和UV-SOR光束线所用单色仪,已列在表2—4。这些光束线的前期工程,都选用较为成熟的单色仪型号,如濑谷-波冈型和蚱蜢型,在后期工程才自行设计新型号。他们大都喜欢用平面光栅(PGM),不赞成用超环面光栅(TGM)。最近UV-SOR和SOR-RING都设计了掠入射平面光栅单色仪,光路结构大致相同。SOR-RING使用离子刻蚀平面矩形光栅,用四块可置换的前反射平面镜,入射角分别安置在 88° 、 75° 、 70° 和 35° ,在不同光子能量区抑制高级次光。光栅后用两块可置换的球面聚焦镜。这台单色仪,可复盖 $8-400\text{eV}$ 光子能量区。

Photon Factory的高分辨率单色仪6VOPE和10GIM,分别为 6.65m 正入射和 10m 掠入射,据称是目前世界上同步辐射实验室使用的最大的、分辨率最高的单色仪。6VOPE于1981年4月完成基本设计,1982年3月完成光栅主室及扫描机构,1983年3月完成其余部分。它是一离轴Eagle装置,分辨率在 $200-40\text{nm}$ 要求达到 $10^5-2 \times 10^6$ 。由于没有得到高质量的刻线密度在 4000l/mm 以上的光栅,所以不得不用高级次光谱。这样,就需要采取措施来避免级次重叠。用两块凹面光栅和中间狭缝形成前置色散系统。主光栅曲率半径 6.65m ,刻线密度 1200l/mm ,刻线面积 $100(\text{H}) \times 175(\text{W})\text{mm}^2$,闪耀波长 550nm 。仪器可以三种不同模式使用:摄谱型,焦面扫描型(即出射狭缝沿焦面移动)和单色仪型(即出射狭缝固定,光栅转动)。若仪器要用在一级光谱测量时,两块前置凹面光栅用半径相同的凹面镜代替,主光栅改用闪耀波长为 150nm 的,其他不变。1983年用这台仪器试拍了氧和氩的吸收光谱,将前置光栅置于零级,主光栅一级,得到 78.5nm 附近的分辨率为 4×10^4 ,尚未达到设计要求。现在仍在做进一步提高分辨率的工作。

10GIM是波冈武教授领导的一个研究小组设计的,设计历时一年半。1983年3月加工完成,安装在BL-12C上。作者访问时,尚在进行最后调整,以达到设计的高分辨率要求。这台单色仪在光路上的特点是采用了由三块镜子组成的校正象差的前置镜聚焦系统,可以和同步辐射光束得到十分好的匹配,因而获得高分辨率。同时,三块镜子和光栅的相对位置固定在一个平台上,波长扫描时,不影响前置镜的聚焦特性。另外,由于光栅是日立公司最新发展的低杂光、高效率凹面机刻光栅,质量好,所以这台仪器能得到较好的性能。仪器的主要参数如下(使用 1200l/mm 光栅时):

入射角	固定 89°		
波长范围(nm)	5—0.6		
光子能量范围(eV)	25—200		
波长分辨率(nm)	0.0004 (狭缝 $5\mu\text{m}-5\mu\text{m}$)		
光栅曲率半径(mm)	10.310 ± 20		
刻线面积(mm)	$80' \times 40''$		
材料	Pyrex		
镀膜材料	金		
闪耀角	$1^\circ 3'$		
闪耀波长(nm)	1.1		
前置镜	M_0	M_1	M_2
曲率半径(mm)	—	8903	7527
材料	SiO_2	pyrex	pyrex

镀膜材料
大小(mm)

铂 铂 铂
 $120' \times 60' \times 15'$ $90' \times 15'$ $90' \times 15'$

对外开放

同步辐射实验室是国家级的对外开放实验室。Photon Factory 1982年建成后即对国内外开放。每年定期公开对外征集科研题目，设有共同利用实验审查委员会，由国内各方面的科学家组成，对各部门提出的课题进行审议，决定是否接受，并安排实验时间。一经接受，即列入计划。有的课题由用户独立完成，而大多数是共同完成。这样，实验室的固定工作人员，既要承担自己的研究课题，也要分担用户提出的课题。实验设备，一般由实验室提供，特殊设备由用户自带。国家机关来做实验的，不收费，并且由Photon Factory支付旅差费，解决食宿。自开放以来，每天有50~100人在做各种各样的实验。1982年4月至1983年9月，共有547个使用者，其中371人来自五十所大学，140人来自国立研究所，36人来自私人企业。1983年度，有效运转时间共2047小时，其中1357小时（占66.2%）是为共同利用提供的。共接受实验课题103个，登记利用者约700名。1984年度登记来做实验的有约800名。Photon Factory也向民间研究机关开放，但要收费用。1983年度安排了21个实验课题，分配实验时间686小时。

在Photon Factory有不少国外科学家去工作，长期的、短期的都有。有日方出资聘请的，也有外方提出共同感兴趣的课题进行合作研究的。他们很重视国际间的合作研究，认为这是同步辐射实验室的一个特点。不同国家、不同领域的科学家，利用同一个设备，共同工作，讨论问题，对促进相互了解，对发展科学都是非常有益的。

UV-SOR在1985年4月开始，将有四条光束线对外开放。

The Synchrotron Radiation Laboratories in Japan

Chen Xingdan and Li Yunshuo

Abstract

There are four synchrotron radiation laboratories in Japan. The authors visited these laboratories in 1984 respectively. In this paper, the general features of them, especially the Photon Factory are presented.