



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

北京同步辐射装置 及其应用

冼鼎昌 主编

BEP-C BSRF



广西科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

北京同步辐射装置及其应用 / 冼鼎昌主编. — 南宁:
广西科学技术出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-5551-0452-0

I. ①北… II. ①冼… III. ①同步辐射装置—北京市
IV. ①0572. 21

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第 277980 号

BEIJING TONGBU FUSHE ZHUANGZHI JI QI YINGYONG

北京同步辐射装置及其应用

主编: 冼鼎昌

策划编辑: 唐一雄 饶 江
责任校对: 袁 霞 李 琦
装帧设计: 韦娇林

责任编辑: 饶 江 梁珂珂
责任印制: 陆 弟

出 版 人: 韦鸿学
出版发行: 广西科学技术出版社
社 址: 广西南宁市东葛路 66 号
网 址: <http://www.gxkjs.com>

邮政编码: 530022

经 销: 全国各地新华书店
印 刷: 广西大华印刷有限公司
地 址: 广西南宁市高新区科园路 62 号
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16
印 张: 30.5
字 数: 592 千字
版 次: 2016 年 1 月第 1 版
印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5551-0452-0
定 价: 60.00 元

邮政编码: 530007

插 页: 4

版权所有 侵权必究

质量服务承诺: 如发现缺页、错页、倒装等印装质量问题, 可直接与本社调换。

服务电话: 0771-5842790。

《北京同步辐射装置及其应用》编委会

主 编 冼鼎昌

副主编 董宝中 胡天斗

编 委 (按姓氏笔画排序)

朱佩平 伊福庭 刘 景

吴忠华 陈栋梁 奎热西·依布拉欣

贾全杰 徐 刚 陶 冶

崔明启 阎永廉 董宇辉

谢亚宁

前言

北京正负电子对撞机工程是在党中央和邓小平同志直接关怀下，国家各部委通力协作的结晶，用于高能物理研究和同步辐射实验研究，即一机两用。1988年10月，北京正负电子对撞机对撞成功，邓小平等中央领导前来参观、祝贺，邓小平同志发表了《中国必须在世界高科技领域占有一席之地》（《邓小平文选》第三卷）的重要讲话。1990年北京同步辐射装置光束线出光，开始对用户开放。

自20世纪70年代以来，美国、日本及欧洲的一些发达国家纷纷建立了同步辐射装置，为多个学科的交叉前沿研究提供先进的大型研究平台。北京同步辐射装置是我国第一台同步辐射装置，第一期建成时仅有5条光束线和5个实验站，后经3次改造扩建才形成目前14条光束线和15个实验站的规模。该装置自1990年对用户开放至今已运行了20多年，形成了一个庞大的用户群，现在每年有100多个国内外的研究机构和大学的用户应用该装置进行400多个研究课题的实验。同步辐射光源具有许多常规光源无法比拟的优良性能，它的应用给科学技术的发展提供了新的途径，让一些在常规光源上认为不可能做的实验成为可能，它已经成为物理学、化学、材料科学、生命科学、环境科学、医药学、地质学、矿物学和微机械加工等学科领域的基础和应用研究的一种最先进的、不可替代的手段。现在同步辐射实验研究已被广泛认为是几乎所有学科不可缺少的研究工具，有力地促进和推动了现代科学技术各个领域的发展。

本书详细介绍了北京同步辐射装置的同步光源结构和特性，14条光束线的布局和结构、性能及参数，15个实验站的实验设备、实验原理和方法、数据处理与分析、研究领域及应用、已获得的典型研究成果等。典型研究成果多具创新特色，如同步辐射软X射线多层膜反射率计装置及其应用研究获得2000年国家技术发明奖二等奖；同步辐射相位衬度成像研究在CT重建理论等方面取得了重要的进展，并将成像研究的成果应用到古生物研究领域，揭示了古生物进化的重大问题；与用户合作开展的蛋白质晶体学研究探测了SARS病毒主蛋白酶及抑制剂复合物结构、高等植物捕光天线复合物LHCII结构、细菌效应蛋白AvrPto和植物中对应的抗性蛋白Pto的复合物结构等具有重要生物学意义的蛋白质结构等。

本书的主编冼鼎昌院士参与组织领导建成了我国第一个同步辐射实验室，并开拓了我国同步辐射应用领域，其他作者均为在北京同步辐射装置第一线工作多年的业务

骨干。书中内容紧密结合北京同步辐射装置的实际，阐述了实验原理和方法，介绍应用研究实例，提示了实验的关键步骤及应注意的要点。本书融合了作者多年的实验研究经验和心得，多有创新之处，是一本理论与实践紧密结合的介绍同步辐射研究的著作。希望本书的出版能提高众多相关领域的科研和工程技术人员对同步辐射装置的认识和应用水平，为发展我国同步辐射实验研究做出新的贡献。

本书可供众多学科的高等院校和科研院所的教师、科研人员和工程技术人员及研究生参考，也可供从事同步辐射应用的专业人员和各实验站管理人员参阅。

谢家麟院士、叶铭汉院士、方守贤院士、陈森玉院士、陈和生院士以及加速器中心工作人员在北京正负电子对撞机和北京同步辐射装置工程中的开创性工作，是该工程高质量建成的关键，为北京同步辐射装置开创性的实验研究奠定了基础。同时，感谢多年来对北京同步辐射装置工作大力支持的广大用户。限于学识水平，书中疏漏不足之处在所难免，祈望广大读者不吝指正。

| 目录 |

1 绪论	冼鼎昌	1
参考文献		7
2 同步辐射光源	徐 刚	9
2.1 概论		9
2.2 储存环		10
2.2.1 储存环		10
2.2.2 电子束		13
2.2.3 发射度		14
2.3 弯铁辐射		15
2.3.1 弯铁辐射		15
2.3.2 光谱特性		17
2.3.3 光子通量		18
2.3.4 亮度		19
2.3.5 偏振性		19
2.3.6 时间结构		20
2.4 插入件		20
参考文献		28

3	同步辐射光束线	阎永廉	30
3.1	光束变换和传输系统		30
3.1.1	引言		30
3.1.2	前端区		30
3.1.3	辐射防护和人身安全连锁系统		32
3.1.4	真空系统		33
3.2	光学系统中的重要元部件		33
3.2.1	镜		34
3.2.2	衍射晶体		38
3.2.3	分光光栅和光栅单色器		41
3.3	北京同步辐射装置光束线概貌		45
3.4	北京同步辐射装置硬 X 波段光束线		47
3.4.1	硬 X 波段光束线概述		47
3.4.2	光束线 1W1B、1W2B、3W1A、4B9A		49
3.4.3	光束线 4W1A		51
3.4.4	光束线 4W1B		53
3.4.5	微束聚焦光束线 4W2		55
3.4.6	弯晶子午聚焦光束线 1W1A、1W2A		56
3.4.7	中能光束线 4B7A		60
3.5	北京同步辐射装置真空紫外波段和软 X 波段光束线		63
3.5.1	光栅单色器光束线概述		63
3.5.2	球面光栅单色器光束线 4B9B		64
3.5.3	变线距光栅单色器光束线 4B7B		68
3.5.4	真空紫外波段光束线 4B8		72
	参考文献		74
4	X 射线生物大分子实验站	董宇辉	76
4.1	蛋白质晶体学		76

4.1.1	引言	76
4.1.2	相位解析方法	77
4.1.3	结构精修及验证	85
4.2	束线及实验装置	87
4.3	应用	88
4.3.1	SARS 冠状病毒的研究	88
4.3.2	菠菜捕光蛋白 LHC-II 结构的研究	89
4.3.3	AvrPto 和 Pto 蛋白质复合物结构的研究	90
4.3.4	AMPK 催化结构区域 (KD) 与自抑制区域 (AID) 结构的研究	91
	参考文献	92
5	X 射线衍射实验站	吴忠华 95
5.1	X 射线衍射原理	95
5.1.1	一个电子的散射	95
5.1.2	一个原子的散射	98
5.1.3	一系列原子的散射	99
5.1.4	一个孤立晶胞的衍射	100
5.1.5	一个晶体的衍射	102
5.1.6	反射球	106
5.1.7	谢乐 (Scherrer) 公式	108
5.1.8	衍射强度修正	109
5.2	束线及实验装置	113
5.3	实验站参数	115
5.4	研究方法	116
5.4.1	X 射线衍射	116
5.4.2	X 射线反射	118
5.4.3	X 射线衍射异常精细结构	119

5.4.4	X 射线反射异常精细结构	119
5.4.5	X 射线吸收精细结构	120
5.4.6	小角 X 射线散射	121
5.5	应用	122
	参考文献	122
6	X 射线漫散射实验站	贾全杰 125
6.1	晶体结构缺陷的 X 射线漫散射	125
6.2	表面、界面的 X 射线散射	128
6.2.1	薄膜材料的 X 射线镜面反射	129
6.2.2	薄膜材料的 X 射线非镜面散射	135
6.3	束线及实验装置	138
6.4	研究方法	140
6.5	应用	142
	参考文献	142
7	X 射线高压衍射实验站	刘 景 144
7.1	高压技术	144
7.1.1	金刚石对顶砧原理及高压条件的获得	144
7.1.2	传压介质和静水压技术	146
7.1.3	压力的测量	147
7.1.4	高温 DAC 技术	149
7.2	高压衍射	150
7.2.1	能量色散 X 射线衍射 (EDXD)	151
7.2.2	角度色散 X 射线衍射 (ADX)	153
7.2.3	原位高压衍射谱的获取	156
7.2.4	EDXD 和 ADXD 的比较	158
7.3	束线及实验装置	159

7.3.1	光束线 4W2	159
7.3.2	微束聚焦系统	160
7.3.3	原位高压 X 射线衍射系统	162
7.3.4	金刚石对顶砧高压装置	165
7.3.5	激光加温系统	167
7.3.6	红宝石测压和拉曼光谱测量系统	170
7.4	应用	172
7.4.1	压致结构相变	172
7.4.2	压缩性质和状态方程	173
7.4.3	压致化学反应	173
7.4.4	高压熔化性质	174
	参考文献	175
8	小角 X 射线散射实验站	董宝中 178
8.1	小角 X 射线散射原理	178
8.1.1	单个电子的散射强度	179
8.1.2	一个分子或粒子的散射强度	179
8.1.3	纪尼叶 (Guinier) 近似律	183
8.1.4	零角度的散射强度	184
8.1.5	粒子形状相同、大小不相同的稀疏颗粒系的散射强度	185
8.1.6	粒子平均散射强度与特征函数	186
8.1.7	相关函数和距离分布函数	187
8.1.8	波罗德 (Porod) 定律	188
8.1.9	分形系统	190
8.2	束线及实验装置	191
8.2.1	小角散射装置	192
8.2.2	自动控制系统	195
8.2.3	数据采集系统	195

8.3	研究方法	196
8.3.1	小角散射装置的分辨率	196
8.3.2	试样的制备和要求	197
8.4	数据处理	197
8.4.1	散射曲线中心点的确定	197
8.4.2	探测器噪音的扣除	198
8.4.3	背底散射的扣除和入射光强的归一化	199
8.4.4	坐标转换	200
8.4.5	数据分析	200
8.5	应用	202
	参考文献	204
9	X 射线吸收精细结构实验站	谢亚宁 207
9.1	XAFS 基础	207
9.1.1	X 射线吸收与荧光	207
9.1.2	XAFS 原理	210
9.2	束线及实验装置与研究方法	216
9.2.1	实验要素及方法综述	216
9.2.2	1W1B-XAFS 光束线	219
9.2.3	透射 XAFS 实验装置及实验要点	220
9.2.4	LYTLE 荧光电离室原理及实验要点	225
9.2.5	固体阵列探测器原理及使用要点	228
9.2.6	透射及荧光两种实验方法总结	230
9.2.7	基于 XAFS 的相关实验方法	231
9.3	数据处理	235
9.3.1	提取 EXAFS 信号 $\chi(k)$	236
9.3.2	拟合求取结构参数	242
9.3.3	XANES 的解释	245

9.3.4	XAFS 数据处理软件	247
9.4	应用	248
9.4.1	催化、化工领域	248
9.4.2	固体物理、材料科学领域	249
9.4.3	结构生物学领域	249
9.4.4	环境科学及其他领域	249
	参考文献	250
10	X 射线成像实验站	朱佩平 253
10.1	X 射线形貌术	253
10.1.1	同步辐射 X 射线形貌术实验原理	254
10.1.2	形貌像的形成	257
10.1.3	形貌图上晶体缺陷	259
10.1.4	应用	263
10.2	硬 X 射线相位衬度成像	265
10.2.1	硬 X 射线相位衬度成像原理和研究方法	266
10.2.2	X 射线相位衬度 CT 成像	284
10.2.3	应用	297
10.3	硬 X 射线纳米分辨 CT	306
10.3.1	引言	306
10.3.2	硬 X 射线纳米分辨 CT 原理	308
10.3.3	应用	310
	参考文献	315
11	X 射线荧光微分析实验站	陈栋梁 318
11.1	X 射线荧光分析原理	318
11.1.1	X 射线荧光光谱	319
11.1.2	X 射线激发 X 射线荧光强度	322

11.1.3	X 射线荧光分析	327
11.2	束线及实验装置	328
11.2.1	4W1B 光束线	328
11.2.2	实验站装置	330
11.2.3	控制系统	333
11.2.4	数据采集系统	333
11.3	实验方法	334
11.4	数据处理	335
11.4.1	数据处理	335
11.4.2	误差分析	337
11.5	应用	338
	参考文献	339
12	软 X 射线光学实验站	崔明启 342
12.1	软 X 射线光学原理	343
12.1.1	软 X 射线能区的界定	343
12.1.2	复折射系数与光学常数	344
12.1.3	吸收与相移	346
12.1.4	全反射角、正入射角及布儒斯特 (Brewster) 角	346
12.2	束线及实验装置	347
12.2.1	软 X 射线光栅单色器光束线 3W1B	347
12.2.2	中能 X 射线双晶单色器光束线 3B3	350
12.2.3	高精度软 X 射线综合测试分析装置	352
12.2.4	同步辐射软 X 射线多层膜综合偏振测量装置	353
12.2.5	软 X 射线绝对光强监测系统	354
12.3	研究方法	356
12.3.1	光束线输出特性诊断	356
12.3.2	光束线偏振特性的测量	357

12.3.3	软 X 射线条纹相机 (SXRSC) 的静态性能研究	357
12.4	在国家高技术中的应用	359
12.4.1	惯性约束聚变实验探测元器件与大型探测设备性能标定研究	359
12.4.2	在国家载人航天器“神舟二号”空间天文分系统中的应用 ...	363
12.5	在材料及光学元件方面的应用	365
12.5.1	低维半导体材料研究	365
12.5.2	纳米碳管光学性能研究	366
12.5.3	金刚石薄膜材料研究	366
12.5.4	软 X 射线激光用分束镜研究	366
12.5.5	软 X 射线磁光法拉第效应研究	366
12.6	展望	368
	参考文献	369
13	光电子能谱实验站	奎热西·依布拉欣 371
13.1	光电子能谱原理	371
13.1.1	引言	371
13.1.2	光电子能谱原理	374
13.1.3	角积分与角分辨光电子能谱	376
13.1.4	电子平均自由程	378
13.1.5	光电子传输机制	380
13.1.6	光电子发射与俄歇电子发射	382
13.2	软 X 射线光电子能谱	385
13.2.1	芯能级光电子能谱实验模式	385
13.2.2	芯能级光电子能谱	389
13.3	光电子能谱实验装置	392
13.3.1	引言	392
13.3.2	电子能量分析器	394

13.3.3	能量分辨率	394
13.4	光电子能谱实验技术新的发展趋势——硬 X 射线光电子能谱	395
13.4.1	引言	395
13.4.2	硬 X 射线光电子能谱	396
13.5	应用	402
13.5.1	引言	402
13.5.2	光束线及能量分辨率	402
13.5.3	应用	404
13.6	光电子能谱实验方法回顾与展望	410
13.6.1	引言	410
13.6.2	实验方法及数据间的关系	411
13.6.3	实验方法上的悖论与漏洞	413
13.6.4	展望	414
13.7	综合型北京同步辐射装置光电子能谱实验平台	416
13.7.1	引言	416
13.7.2	实验平台配置及功能	416
13.7.3	重要功能的指标参数	417
	参考文献	419
14	真空紫外光谱实验站	427
14.1	真空紫外光束线 4B8	427
14.2	同步辐射圆二色谱 (SRCD)	429
14.2.1	引言	429
14.2.2	SRCD 谱仪	431
14.2.3	SRCD 测试注意事项	439
14.2.4	CD 分析和数据库	441
14.2.5	SRCD 应用	444
14.3	真空紫外激发荧光光谱	447

14.3.1 真空紫外荧光光谱仪	448
14.3.2 真空紫外荧光光谱应用	448
14.3.3 时间分辨荧光光谱	449
参考文献	451
 15 X 射线光刻及 LIGA 实验站	伊福庭 454
15.1 概论	454
15.2 北京同步辐射装置光刻束线及实验站	455
15.3 同步辐射纳米光刻技术	459
15.4 同步辐射 LIGA 技术	461
15.5 应用	469
参考文献	470

1 绪论

同步辐射是电磁辐射，通常指速度接近于光速的运动电子或正电子在磁场中弯转时放出的光。

有加速度的荷电粒子在运动时放出电磁辐射这一现象早在 19 世纪末就曾经由 Larmor 研究过^[1]。19 世纪末发现了电子，电子在圆周轨道上发出的电磁辐射功率也随即由 Liénard 导出^[2]，而且这种辐射的性质也于 20 世纪初在理论上得到详尽的研究。电子的发现表明了原子确实存在而且是有结构的，电子是原子的组成部分。由此，有科学家猜想，长期以来观察到物质在燃烧时发出的光具有一系列不连续的波长（即所谓光谱线）的现象，或许可以从原子内的电子在不同轨道上的不同向心加速运动上得到解释。因为如果电子在原子内的运动轨道是闭合的，其必定是在做有向心加速度的运动，而且不同轨道的不同回转频率应当影响到发光频率。1907 年，英国剑桥大学的数学家肖特（G. A. Schott）以原子内电子是在均匀磁场中运动而发光为出发点来计算电子辐射的不连续谱^[3]。他以数学家特有的系统性和严谨性，详尽地计算出氢原子中的电子沿不同的轨道所发出的光谱的性质以及辐射的角分布。他还把他的研究结果总结在一本名为《电磁辐射》^[4]的专著里。

肖特的研究很出色，他于 1908 年获得卓有声誉的剑桥大学亚当斯奖。但他关于氢原子光谱的解释是不对的，直到丹麦物理学家尼·波尔建立氢原子的量子理论后才给出了正确的答案：原子光谱是不能用经典的电磁理论解释的，原子中的电子只能处于一系列不连续的能量状态上，由于能量守恒，电子从一个状态变化到另一个状态时放出或吸收的能量也是不连续的，这种能量以光子的形式发射或吸收，这就是发射或吸收光谱线的成因。

在波尔的原子理论建立之后，肖特的研究很快地便被世人遗忘，除了在教科书上偶尔提到他曾经做过的不成功的尝试之外。几十年后，随着电子加速器、宇宙线物理和高能物理的发展，人们才又重新记起他的研究结果。

19 世纪末发现的 X 射线在各领域的应用中迅速取得的巨大成功，有力地推动了各学科的发展；反过来，各学科的发展对 X 射线源又提出了越来越高的要求。20 世纪 40 年代，核物理的发展需要使用更高能量的 X 射线来研究原子核的性质，这就要求产生 X 射线的设备中打靶的电子流具有更高的能量。当时获得高能量电子流的手段是使用电子感应加速器（betatron）。虽然随着加速器物理的发展，加速器技术有了很大的发展，但是加速器中的电子在圆形轨道上要辐射光子，损失能量，这就限制了电子所能达到的最高能量。Ivanenko 和 Pomranchuk 指出，对于电子感应加速器，极限能量是 500 MeV^[5]。不过随着加速器物理的发展，这个极限值早就被突破，当然，突破的重要基础是补偿因光子辐射而损失的能量和同步加速器原理的提出。

宇宙线是从太空飞来落在地球上的高能粒子。如果这粒子是电子，那么它在远没