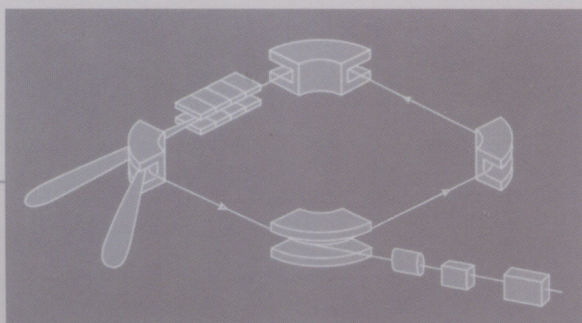
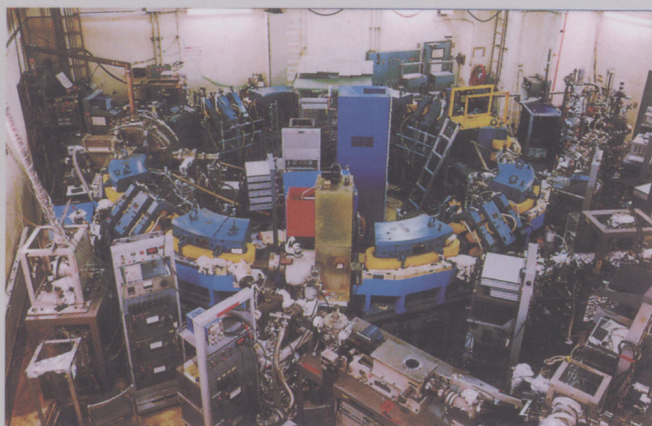


材料科学与工程学科教材系列

同步辐射科学基础

Introduction to
Synchrotron Radiation Research



主编 渡辺 誠 佐藤 繁

主审 张新夷 马礼敦 周映雪

译者 渡辺 誠 丁剑 乔山 张小威 吴国忠 郭其新 等



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

同步辐射科学基础

主 编	渡辺誠	佐藤繁	
主 审	张新夷	马礼敦	周映雪
译 者	渡辺誠	丁 剑	乔 山
	张小威	吴国忠	郭其新 等

TL501

D904

上海交通大学出版社

内 容 提 要

同步辐射是被加速到接近光速的电子,在磁场中因向心加速度而改变运动方向时产生的亮度极高、性能极佳的辐射。基于同步辐射的各种现代实验技术,在凝聚态物理和材料科学、化学与聚合物科学、生物和医学、分子环境科学、农学和林学等众多领域以及广泛的工业应用中,已是不可或缺的手段。该书从同步辐射的特性及其产生原理说起,阐述了同步辐射光源和光束线技术;解说了原子、分子、晶体及晶体表面的关于真空紫外、软 X 射线谱学和光电子能谱的电子结构研究;解说了利用硬 X 射线的 X 射线衍射的晶体结构解析,利用扩展 X 射线吸收精细结构技术的物质局域结构分析,以及 X 射线荧光分析和关于非弹性散射的电子结构研究,等等。研究对象涉及无机材料和有机材料的晶体、非晶体、液体,表面与界面以及蛋白质等诸多方面。此外,还介绍了利用同步辐射的工艺应用研究、红外线谱学、从红外线到软 X 射线、硬 X 射线的成像研究等。本书可以作为同步辐射科学研究人员的教材和参考工具。

图书在版编目(CIP)数据

同步辐射科学基础/(日)渡辺誠,(日)佐藤繁主编;
(日)渡辺誠等译. —上海:上海交通大学出版社,2010
ISBN 978-7-313-06358-8

I. ①同… II. ①渡…②佐… III. ①同步辐射—高等
学校—教材 IV. ①TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 051567 号

上海市版权局著作权合同登记号 图字:09-2009-675 号

同步辐射科学基础

主编 渡辺誠,佐藤繁

译者 渡辺誠 等

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海华业装璜印刷厂有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.5 插页:2 字数:478 千字

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

印数:1~3030

ISBN 978-7-313-06358-8/TL 定价:58.00 元

版权所有 侵权必究

译者名录

渡辺誠

丁 剑(上海交通大学)

乔 山(日本広島大学,现复旦大学)

张小威(日本高能加速器共同研究機構(光子工厂))

吴国忠(上海应用物理研究所)

郭其新(日本佐賀大学同步辐射应用研究中心)

杨金峰(日本大阪大学産業科学研究所)

刘小井(日本东北大学多元物质科学研究所)

顾佳俊(上海交通大学)

陈 林(日本东京大学,现日本原谦三国际专利事务所)

陆继宗(上海电机学院)

原著者名录

(以日语 50 音图为序)

石井久夫(7.7)
伊藤 翼(10.3.3)
上田 潔(6,附录 G、H)
海野昌喜(9.6)
江刺正喜(8.2)
江島丈雄(7.5.3、14.2.1)
大谷栄治(9.5.1、9.5.2)
梶谷 剛(9.1、9.2.1、9.2.2)
神嶋 修(10.3.4)
栗原和枝(9.7)
河野省三(7.9)
近藤泰洋(3.5.1、5.7、13.1、13.2、13.3.1.c、14.2.3、附录 A)
齋藤正男(9.6、10.5)
佐藤 繁(2、7.1、7.2、7.5、7.8)
鈴木章二(5.1、5.2.1、5.2.3、5.2.4、5.3.1、5.4、5.8、7.3.2、14.2.1)
高桑雄二(8.1)
田中章順(7.8)
辻 幸一(11.1、14.2.2)
田路和幸(10.3.1)
庭野道夫(13.3.3)
野田幸男(9.2.3、9.3、9.5.3)
羽多野 忠(5.2.2、5.5)
浜 広幸(3.5.2、附录 E)
林 久史(12)
福田 寛(14.2.4)
松原英一郎(9.8、10.4、11.2)
村上洋一(9.4)
柳原美廣(4、7.4、14.2.2)
米永一郎(14.3)
早稻田嘉夫(9.8)
渡辺 誠(1、3、5.3.2、5.6、7.1、7.2、7.3.1、7.4、7.5、7.6、9.1、9.2.1、
9.2.2、10.1、10.2、10.3.2、13.3.1、13.3.2、14.1、14.2.1、
14.2.2、附录 A、B、C、D、F、I、J、K、L)

审阅者序

日本同步辐射界的专家渡边诚(WATANABE, Makoto)和佐藤繁(SATO, Shigeru)教授主编的专著:《同步辐射科学基础》于2004年初在日本出版。渡边教授是我们的老朋友,他把这本书送给了我们。这是一册既包含同步辐射光源和实验技术的基础理论,又对有关实验装置和相应的应用研究作出详尽介绍的专著。渡边教授考虑到该书与国内由马礼敦、杨福家主编的《同步辐射应用概论》一书可相互补充,决定请一些学者把该书译成中文,介绍给中国读者。2005年的一天,渡边教授来到张新夷办公室,他希望能邀请几位中国在这一领域的科学家帮助校阅中译文的学术用语。当时,合肥光源已经完成二期工程建设,性能有了很大提高,新建的8条光束线和相应实验站都已投入使用;北京同步辐射装置因北京正负电子对撞机的升级改造,可望在性能上有很大提高;上海光源已开始按计划建设,可以预见几年后将迎来中国同步辐射科学和应用研究的大发展。张新夷当即就答应了渡边教授,于是马礼敦、周映雪和张新夷一道开始了该书中译文的审阅,没想到全书的审阅竟花费了四年多时间。期间,丁剑参加了前期的讨论,2008年初起,乔山也参加了审阅。由于他们两人懂日语,更帮助我们在推敲译文时可以与日文原著进行对照。

在审阅过程中,我们遵循的原则是对原著负责,对读者负责,常常为一句话、一个词,反复讨论,乃至争论。我们很快就发现,我们的工作绝不是简单的对一些专业术语的认定。我们必须先要把原著的含义弄清楚,再反复斟酌,使译著既保持日文原著的特色,又符合中文的习惯性表述。为了判断译文是否准确,我们需要查阅大量的文献和书籍,还经常向有关专家请教,或通过网络对译文内容和专业术语进行认真推敲,有时还要求渡边教授把原著中的一句话,甚至一个段落翻译成英语,经过反复讨论,最终达成共识。与渡边教授的全程合作,是完成审阅工作的重要保证。渡边教授常说,没有我们的审阅,此书的中文版难以面世,因此提出要把审阅者的名字写在封面上;我们同样也要说,没有渡边教授的努力,中文版的审阅也是无法完成的。渡边教授是位极其严谨的学者,且自始至终一丝不苟、精益求精。他认真、执着的态度和细致、务实的风格深深地感染了我们。而在这几年中,无论是同步辐射光源还是实验技术都在迅速地发展,渡边教授同意在中文版里对原著作了一些适当的、必要的“与时俱进”的修改和补充,我们对渡边教授的科学态度表示深深的敬佩,并向所有不吝赐教的同行专家表示由衷的谢意。

当今,上海光源已建成并于2009年5月6日正式向用户开放,其优异的性能和强大的功能牢牢地吸引着广大同步辐射用户,几个月来已有数以百计的用户在上海光源开始了他们的研究工作。另外,作为第四代光源的SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)的LCLS (Linear Coherent Light Source)于2009年4月21日获得了世界上第一束波长为 $1.5\text{\AA}$ 的硬

X 射线激光,并于 2009 年 10 月 1 日正式向用户开放,开始了第一个用户实验。同步辐射科学与应用迎来了她的新时代,本书中文版的出版,可谓“恰逢其时”。我们真心希望本书中文版能使中国读者受益,但由于我们的知识水平有限,难免有疏漏或不当之处,敬请读者批评指正。

审阅者 张新夷 马礼敦 周映雪

2009 年 12 月

前言

同步辐射(synchrotron radiation)是电子以接近光速的速度作圆周运动或蛇行运动,在改变运动方向时,沿着运动轨道的切线方向发出的电磁辐射,或称作光。这种辐射覆盖从红外线、紫外线、软 X 射线到硬 X 射线的宽广的波段,即它是可在宽广的能量区域中利用的高亮度的性能优越的光。特别在软 X 射线和硬 X 射线波段,除了同步辐射,尚无强度足够并且可以自由选择波长的光。另外,在合成或提炼新物质的过程中,研究物质的微细构造非常重要。利用同步辐射得到的物质的吸收谱学、光电子谱学、发光谱学和 X 射线结构解析、扩展 X 射线吸收精细结构(EXAFS)、X 射线荧光分析、图像摄影等测量手段,目前在物质科学、生命科学的评价和分析中不可或缺。全世界正在运行的同步辐射设施多达 50 台以上,从中也可看出同步辐射的重要性。在中国大陆,从 20 世纪 80 年代末开始,有两台同步辐射光源供用户使用。2009 年,上海光源的建成并投入运行,更是标志着中国的同步辐射应用研究进入了一个新的阶段。

本书的原著是日本东北大学在倡议同步辐射设施计划的建议时,为了促进有关人员对于同步辐射的了解,由东北大学研究人员执笔的关于同步辐射科学的一本入门书。本书可以作为有志于利用同步辐射开展研究或对同步辐射光源用电子加速器感兴趣的学者的教科书。主编者重点阐述有关同步辐射的基础知识,各领域的专家主要根据他们的研究成果解说各自的同步辐射应用研究。本书的读者须具备电磁学、量子力学和固体物理学等基础。

第 1 章是序论,主要阐述同步辐射科学总体概要,并侧重对同步辐射的特征加以说明。第 2 章从公式的导出详细说明同步辐射产生的原理。第 3 章阐述光源加速器的原理和基础知识。第 4 章阐述光和物质相互作用的基础,这是学习后续章节的必要基础性理论,但并未详细阐述有关固体物理等理论。第 5 章简单介绍基于同步辐射的新的分光与光谱技术。第 6 章起是关于应用研究的解说。根据真空紫外、软 X 射线波段的光谱学,第 6 章和第 7 章分别介绍气体(原子、分子)和固体(晶体及晶体表面)的电子构造是如何利用同步辐射理论来阐明的。第 8 章的主题是同步辐射的一个很大的应用研究领域,即利用同步辐射的工艺研究,跨越软 X 射线与硬 X 射线的应用。第 9、10、11 和 12 章是关于硬 X 射线的应用研究,分别阐述关于 X 射线衍射的结构解析、EXAFS 的局域结构分析、利用 X 射线荧光的分析和结构解析,以及关于非弹性散射的电子结构研究等,研究对象涉及无机材料和有机材料的晶体、非晶体、液体、表面和界面以及蛋白质等多方面。第 13 章是在长波长波段的研究,即红外光谱学的介绍。第 14 章阐述从红外线到软 X 射线和硬 X 射线波段的成像研究。相信通过对第 6 章及之后各章的学习,可望全面了解同步辐射在物质科学及生命科学研究领域的重要性。另外,附录中阐述了若干基本且重要的公式及其导出过程。本书除个别有特殊说明之处外,统一使用 SI 单位。

关于出版中文版的背景介绍如下:

2004年,原书主编之一渡边,作为上海电机学院的客座教授,以及上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室的特聘教授赴任上海。该年12月,上海光源的建设被批准。在同步辐射应用研究领域,马礼敦、杨福家主编的《同步辐射应用概论》已经出版,不过,渡边判断本书与该书具有互补性,并且着重于基础性,所以把原书翻译成中文将非常有利于今后在中国开展同步辐射的研究。另一位主编佐藤对这一意向十分赞同。于是,他们邀请中国友人中的科研人员翻译或审阅,由渡边汇总。主编者们希望本书将成为更多的年轻人,特别是有兴趣的人们涉足同步辐射科学的契机,并且希望有益于已经开始同步辐射研究的学者推进他们的工作。若本书能进一步有利于孕育产生日中合作研究,我们将感到无比喜悦。

本书由张新夷、马礼敦、周映雪三位专家审阅。各章节的翻译分工如下(括号内为负责翻译的章节):丁剑(1、9、10章)、乔山(2、7章、附录I)、张小威(4、5、14章、附录A、L)、吴国忠(11、12、13章)、郭其新(3、8章、附录B、C、D)、杨金峰(3章、附录E)、刘小井(6章)、顾佳俊(7章(前半)、附录I、J、K)、陈林(13章)、陆继宗(附录B、C、D、F、G、H),渡边诚(3、4、6章,7章(前半),附录B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L)。对于审阅者和翻译者的通力合作和无私支持,我们深表谢意。同时,对支持本书出版的上海电机学院和上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室,对支持本书出版,资助NSFC50401005项目的国家自然科学基金委员会,及资助06PJ14050(上海市浦江人才计划)的上海市科学技术委员会和上海市人力资源和社会保障局谨致谢意。并且,对将中文版著作权慨然转让于主编们的日本东北大学出版社表示深深的感谢。

以下向在编辑日文原书时给予支持的各位谨致谢辞。他们是在EXAFS公式方面给予指教的石井忠男,提供了数据的谷口雅树和佐藤仁,给予恰当建议的村田隆纪,提供了从单色器出射的X射线光谱的铃木基宽,提供了X射线荧光分析的数据图的桜井健治、中井泉、早川慎二郎,提供了康普顿散射数据图的桜井吉晴,提供了红外波段数据图的木村真一、木村洋昭、篠田圭司、高橋俊晴,提供了X射线显微镜照片的青木贞雄、渡边纪生、木原裕、竹本邦子,同意了图的引用的D. Attwood、A. R. Lang、G. Margaritondo、V. Saile和MicroParts公司、柿崎明人、木下豊彦、菅滋正、関一彦、飯田厚夫,提供相干光数据图的柴田行男,提供高温超导体数据图的高橋隆,提供PIXE数据图的田中晃、窪田和雄、石井慶造,关于成像光学系统给予适当指正的山本正树等各位。

同时,在此对同意引用图片的学术团体及出版社深表谢意。它们是The American Physical Society (Physical Review, Physical Review Letters), Institute of Physics, United Kingdom (Journal of Physics: Condensed Matter), International Union of Crystallography (Journal of Synchrotron Radiation), Elsevier (Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, Materials Science Engineering, Journal of Crystal Growth), Gordon and Breach Science Publishers (Ferroelectrics), Pergamon Press (Solid State Communications), 日本应用物理学会 (Japanese Journal of Applied Physics), 日本金属学会 (Materials Transaction, The Japan Institute of Metals), 日本物理学会 (Journal of Physical Society of Japan), 日本放射光学学会(放射光), 高辉度光科学研究中心。

最后,对同意出版本书的上海交通大学出版社以及热情支持本书出版并付出大量心血的余志洪和崔霞两位编辑谨致谢意。

主編 渡辺誠 佐藤繁

2009年12月

目 录

1	绪言——同步辐射的特征及用途	(1)
1.1	发展历史	(1)
1.2	同步辐射的特性	(6)
1.2.1	电子束的形状及同步辐射强度的单位	(6)
1.2.2	来自弯转磁铁(圆周运动产生)的辐射	(7)
1.2.3	波荡器产生的辐射	(8)
1.2.4	相干性	(10)
1.2.5	光束线站处的同步辐射	(10)
1.3	应用研究	(11)
1.3.1	真空紫外、软 X 射线的应用研究	(12)
1.3.2	硬 X 射线的应用研究	(13)
1.3.3	红外线的研究	(15)
1.4	同步辐射光源与其他光源的比较	(15)
	参考文献	(17)
2	同步辐射产生的机理	(19)
2.1	电子运动的相对论描述	(19)
2.1.1	狭义相对论概要	(19)
2.1.2	电磁场中电子的运动方程	(20)
2.2	运动电子发出的电磁波	(20)
2.2.1	李纳-维谢尔(Liénard-Weichert)势	(20)
2.2.2	运动电子产生的电磁波	(23)
2.3	圆周运动产生的辐射	(26)
2.3.1	辐射的方向性	(26)
2.3.2	辐射功率	(27)
2.3.3	辐射强度的能量分布	(27)
2.3.4	角度分布	(29)
2.4	波荡器产生的辐射	(30)
2.4.1	平面波荡器产生的辐射	(30)
2.4.2	螺旋波荡器产生的辐射	(34)

3	同步辐射光源	(36)
3.1	整体结构	(36)
3.2	电子束的轨道	(36)
3.2.1	磁铁对电子束的作用	(37)
3.2.2	磁场	(38)
3.2.3	运动方程	(38)
3.2.4	运动方程的解	(39)
3.2.5	轨道的各种参数	(42)
3.2.6	磁铁	(44)
3.3	高频加速	(45)
3.3.1	同步加速器振荡	(45)
3.3.2	运动方程	(46)
3.3.3	辐射衰减	(47)
3.3.4	高频腔	(48)
3.4	电子束的寿命及不稳定性	(49)
3.4.1	真空	(49)
3.4.2	图谢克(Touschek)效应	(52)
3.4.3	不稳定性	(52)
3.5	相干光的发生	(53)
3.5.1	红外线相干辐射	(53)
3.5.2	自由电子激光	(54)
	参考文献	(55)
4	物质对光的响应	(57)
4.1	物质与光的电磁学	(57)
4.1.1	介电常数和光学常数	(57)
4.1.2	菲涅尔(Fresnel)公式	(59)
4.1.3	克拉默斯-克勒尼希(Kramers-Krönig)分析	(63)
4.2	物质和光响应的微观经典论	(64)
4.2.1	洛伦兹(Lorentz)模型	(65)
4.2.2	德鲁德(Drude)模型	(68)
4.2.3	原子散射因子、偏振因子	(70)
4.3	光跃迁的量子论	(73)
4.3.1	光跃迁的一般理论	(73)
4.3.2	一阶过程	(74)
4.3.3	二阶过程	(76)
4.3.4	俄歇(Auger)过程和辐射过程	(78)
	参考文献	(80)

5	分光与光谱技术	(81)
5.1	物质对光的吸收	(81)
5.2	聚焦镜	(82)
5.2.1	单一物质的反射率	(82)
5.2.2	多层膜	(83)
5.2.3	成像的条件	(85)
5.2.4	镜子材料、冷却和污染等问题	(86)
5.3	单色器	(87)
5.3.1	衍射光栅单色器	(87)
5.3.2	晶体单色器	(92)
5.4	滤波器	(95)
5.5	起偏器	(96)
5.6	探测器	(97)
5.6.1	零维探测器	(97)
5.6.2	一维探测器	(98)
5.6.3	二维探测器	(98)
5.7	时间分辨测定	(99)
5.8	光束线	(100)
	参考文献	(101)
6	气体的真空紫外、软 X 射线光谱	(103)
6.1	原子光谱	(103)
6.1.1	单电子跃迁谱	(103)
6.1.2	双电子激发——自电离	(104)
6.1.3	巨大共振	(105)
6.2	分子光谱	(106)
6.2.1	玻恩-奥本海默(Born-Oppenheimer)近似和内壳层光电子谱	(106)
6.2.2	形状共振效应	(108)
6.2.3	简并内壳层激发态的分裂和动量画像测量	(109)
	参考文献	(111)
7	固体的真空紫外、软 X 射线光谱	(113)
7.1	晶体的电子构造	(113)
7.2	在晶体中的光跃迁过程	(114)
7.3	光谱测量	(115)
7.3.1	吸收、发光谱测量	(115)
7.3.2	光电子能谱测量	(116)
7.4	半导体、离子晶体	(121)

7.5	金属	(125)
7.5.1	贵金属及碱金属	(125)
7.5.2	过渡金属	(127)
7.5.3	稀土金属	(128)
7.6	高温超导体	(131)
7.7	有机材料	(135)
7.7.1	有机材料的软 X 射线吸收谱	(135)
7.7.2	有机材料的光电子谱	(136)
7.8	金属介观体系的光电子谱	(140)
7.9	固体表面	(142)
7.9.1	固体表面的光电子谱	(142)
7.9.2	固体表面的光电子衍射	(144)
	参考文献	(147)
8	利用同步辐射的工艺研究	(151)
8.1	表面光反应	(151)
8.1.1	固体表面的光激发反应的基本过程	(151)
8.1.2	用光激发清洁半导体表面	(152)
8.1.3	利用光激励表面反应生长新材料和产生刻蚀	(153)
8.2	微细加工	(156)
	参考文献	(158)
9	X 射线的结构解析	(160)
9.1	晶体的弹性散射	(160)
9.1.1	衍射强度	(160)
9.1.2	德拜-沃勒 (Debye-Waller) 因子	(162)
9.1.3	电子密度分布	(163)
9.2	衍射实验法	(163)
9.2.1	粉末晶体结构解析	(163)
9.2.2	单晶结构解析	(166)
9.2.3	同步辐射 X 射线衍射的优点	(167)
9.3	高温超导体、有机导体及铁电体的结构解析	(170)
9.3.1	高温超导体	(170)
9.3.2	有机导体	(171)
9.3.3	铁电体	(173)
9.4	电荷、轨道有序体系——钙钛矿型 Mn 氧化物	(176)
9.4.1	电荷分布规律的观测	(176)
9.4.2	轨道分布规律的观测	(177)
9.5	高压下的结构解析	(179)

12	X 射线非弹性散射	(225)
12.1	X 射线非弹性散射的梗概	(225)
12.2	X 射线非弹性散射的散射截面	(227)
12.3	X 射线非弹性散射光谱	(228)
12.3.1	苯的散射光谱中表现出来的转移动量相关性	(228)
12.3.2	金属锂的康普顿(Compton)散射	(229)
12.3.3	郝斯勒(Heusler)合金的康普顿磁散射	(230)
12.3.4	水的 X 射线喇曼(Raman)散射	(230)
	参考文献	(231)
13	红外光谱	(233)
13.1	同步辐射红外线的特点	(233)
13.2	红外光束线站	(234)
13.2.1	前端区	(234)
13.2.2	测量装置	(235)
13.3	固体及吸附气体表面的红外光谱	(236)
13.3.1	电子状态的研究	(236)
13.3.2	碱金属卤化物晶格振动的压力效应	(239)
13.3.3	半导体表面的原子、分子吸附	(240)
	参考文献	(243)
14	成像	(245)
14.1	成像和衬度	(245)
14.2	成像光学系统的成像	(246)
14.2.1	成像光学系统	(246)
14.2.2	软 X 射线、硬 X 射线显微镜及其应用研究	(248)
14.2.3	红外显微镜	(251)
14.2.4	生理学研究对同步辐射显微镜的期待	(253)
14.3	X 射线形貌术	(255)
14.3.1	X 射线形貌术的原理	(256)
14.3.2	X 射线形貌像及其观测实例	(256)
	参考文献	(260)
	附录	(262)
	A. 有关光成像的事项	(262)
	B. 圆周运动产生的辐射光谱与光子的平均能量	(263)
	C. 圆周运动产生的辐射角度分布	(266)
	D. 波荡器产生的辐射光谱	(268)

E. 自由电子激光(FEL)	(271)
F. 在库仑场和自由空间中的波动方程的极坐标解	(274)
G. 法诺(Fano)效应	(275)
H. 玻恩-奥本海默近似, 弗兰克-康登(Frank-Condon)因子	(277)
I. van Hove 奇异性	(279)
J. 磁光效应	(280)
K. 磁矩	(284)
L. 能量损失函数	(285)
索引	(289)



绪言——同步辐射的特征及用途

在波长短于人们熟知的可见光(波长:750~400 nm,能量:2~3 eV)和紫外光(波长:400~200 nm,能量:3~6 eV)的宽广的波段范围里,存在着人们日常生活工作中用到的很多种光,在不同波段它们分别被称为真空紫外、软 X 射线(200~0.4 nm, 6 eV~3 keV)和硬 X 射线(0.4~0.01 nm, 3~100 keV)。同步辐射(Synchrotron radiation, SR)是一种能提供上述宽广范围中各种光的性能优越的光源。这种辐射是当电子以接近于光速的高速作圆周运动或者蛇行运动时,从电子运动轨迹的切线方向得到的。目前,它已经成为基础科学、物质科学及生命科学等众多领域中的强有力的研究手段。此外,同步辐射在红外线波段也得到了应用^[1~6]。

1.1 发展历史

同步辐射是 1947 年在美国通用电气公司的同步加速器中首次被观测到的^[7]。尽管产生辐射的原理与天线中的电流振荡(电荷的交变流运动)所释放的电磁波相似,但有所不同,其不同点是发射同步辐射的电子运动是相对论性质的。这种来自电子圆周运动的辐射曾经被认为是同步加速器加速电子时的不利副产物。之所以这样说,是因为同步辐射的释放必须给电子额外补充能量。不过,这种辐射的波长(能量)范围广、波长连续、强度高,而且具有优良的偏振特性。这些性质是在 20 世纪 60 年代前半期,在真空紫外、软 X 射线波段尚不具备良好的实验室连续光源时,由研究原子、分子及固体光谱学的科学家们首次认识到的。最初的实验是美国(国家标准局, NIST)利用加速能量为 180 MeV 的电子同步加速器(SURF I)进行的双电子激发吸收谱实验。随后,意大利(Frascati 国家试验室, LNF)、日本(东京大学原子核研究所, INS-SOR)、德国(电子同步加速器研究所, DESY)、英国(Daresbury 研究所, NINA)等分别发现了这种现象。物质对于真空紫外、软 X 射线的响应(吸收等)非常之大,这使这种辐射成为研究物质电子结构不可缺少的工具。而随着这种辐射变为硬 X 射线,它对物体的透射率逐渐增大,用它可以拍摄到伦琴(Röntgen)照片。由于其波长接近于原子间距离,从而被利用来研究晶体中的原子配置成为可能。真空紫外、软 X 射线及硬 X 射线能够激发具有元素固有束缚能的内壳层电子。此外,由于它们的波长短于可见光,衍射造成的图像的模糊(衍射模糊)程度理所当然地比较小。20 世纪 60 年代后半期开始,研究人员逐渐认识到同步辐射 X 射线的用途,有关它的利用研究也得到了全力开展。

同步加速器是将电子加速到高能后冲击到靶上,用于进行高能物理学(基本粒子或原子核物理学)实验的装置,它的加速频率约为每秒数十次。这种情况下,每一次加速后的电子束强度非常离散,造成同步辐射的强度也相应离散,并不适合进行精密实验。在这种背景下,从 20 世纪 70 年代开始,利用同步辐射的研究人员开始利用电子储存环。这是一种将电子或正电子