



现代物理基础丛书

50

同步辐射光源 及其应用

(上册)

麦振洪 等著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代物理基础丛书 50

同步辐射光源及其应用

(上册)

麦振洪 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是由国内三个同步辐射装置第一线的 40 多名业务骨干共同编纂而成, 全面介绍同步辐射的产生、性质、加速器、光束线和实验方法、数据分析、应用实例以及国际发展趋势。全书共分 19 章: 前 4 章介绍同步辐射装置, 主要包括同步辐射源、同步辐射产生原理、同步辐射装置光路和同步辐射探测器。第 5~19 章介绍同步辐射实验方法, 主要包括国内三个同步辐射装置目前已有的部分光束线站、实验方法及应用实例。本书力图理论联系实际、深入浅出, 而又不失其先进性、实用性和普适性, 既有基础理论、基本原理深入浅出的介绍, 也有实验装置和翔实的应用实例。

本书可供从事材料科学、生命科学、环境科学、物理学、化学、医药学、地质学等学科领域的高等院校和科研院所的教师、科研人员和工程技术人员以及研究生参考, 也可供从事同步辐射应用专业人员和各实验站管理人员参阅, 尤其适合那些计划到同步辐射实验站进行实验的研究人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

同步辐射光源及其应用. 上册/麦振洪等著. —北京: 科学出版社, 2013
(现代物理基础丛书; 50)

ISBN 978-7-03-036458-6

I. ①同… II. ①麦… III. ①同步辐射-加速器 IV. ①TL54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013) 第 010176 号

责任编辑: 刘凤娟 尹彦芳 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2013 年 3 月第一次印刷 印张: 36

字数: 702 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

1947 年, 位于美国纽约州 Schenectady 的通用电气实验室 (GE Lab) 在调试新建成的一台 70MeV 电子同步加速器时, 看到一种强烈的光辐射, 从此这种辐射便被称为“同步加速器辐射”(synchrotron radiation), 在中国的文献中简称其为“同步辐射”. 同步辐射是速度接近光速的带电粒子在磁场中做变速运动时放出的电磁辐射, 一些理论物理学家早些时候曾经预言过这种辐射的存在. 这些预言, 大多是针对其负面效应而作出的. 以加速电子为例, 建造加速器令电子在其中运行, 通过磁场增加电子的速度, 从而得到高能量, 视为正面效应; 然而在加速器中转圈运行的电子一定要放出辐射, 从而丢失能量, 视为负面效应. 得失的平衡, 给出加速器提速的限制. 纵观当年与加速器有关的研究论文题目, 大多冠以“论感应电子加速器的能量获得极限”之类的标题, 还推算出这个极限是 500MeV. 好在没过多久, 苏联和美国加速器物理学家 Veksler 和 McMillan 先后独立提出了新的同步加速器原理, 总算突破了这个“限速关”. 通用电气实验室建造的那台电子同步加速器, 就是美国人为了检验新原理而建造的.

同步辐射是加速器物理学家发现的, 但最初它并不受欢迎, 因为建造加速器的目的在于使粒子得到更高的能量, 而它却把粒子获得的能量以更高的速率辐射掉 (电子每绕加速器一圈辐射掉的能量 $\propto E^4$, 能量越高的电子辐射损失越快), 它只作为一种不可避免的现实被加速器物理学家和高能物理学家接受. 不过固体物理学家对这种辐射相当感兴趣, 即使在发现同步辐射的早期, 已经有人在构思它在非核物理中可能的重要应用, 但真正恢复名誉还要再等十年.

1956 年, Tambouliau 与 Hartman 对康奈尔大学的 300MeV 电子同步加速器产生的同步辐射性质进行了研究, 如同理论所预期, 该加速器发出的同步辐射最丰富的光谱范围在真空紫外 (VUV) 光波段, 对光谱及角分布的实验测量结果与理论预期完全吻合, 他们还测量了同步辐射在铍及铝上的吸收谱, 测得 Be-K 及 Al-L_{2,3} 的不连续谱线. 他们的工作是同步辐射早期应用的先行性工作之一. 也就在这个时候, 在莫斯科 Lebedev 研究所的 250MeV 加速器上也开展了类似的先行性工作.

1961 年, Madden 和 Codling 沿华盛顿美国国家标准局 (NBS) 的 180MeV 电子同步加速器中一处电子轨道的切线方向引出了同步辐射, 以研究它作为真空紫外波段标准光源的可行性, 并首次用它来进行原子光谱学的研究. 结果表明, 辐射性质完全与理论计算相符, 完全可以作为标准 VUV 光源. 他们把辐射中最为丰富的真空紫外连续光谱部分 (16.5~27.5nm) 作为连续背景源用于氦的吸收谱研究, 观

察到许多此前没有观测到的自电离态, 它们都是处在比氦的第一激发限 (24.6eV) 高 35eV 之上、由双电子同时激发的态, 它们与附近的连续态相互作用的结果是寿命非常短, 只能用同步辐射作为光源才能得到它们的吸收谱, 可见此加速器是一个理想的 VUV 光源. 他们的实验结果澄清了关于氦原子双电子激发理论计算的分歧, 并证实了近十年前中国物理学家吴大猷和马仕俊在这方面理论工作的正确性. Madden 和 Codling 的工作被认为是走向系统应用同步辐射的巨大推动, 直至今日, 这些惰性气体内壳层双电子激发态仍然是研究电子-电子关联的重要实验手段.

大概也就在这个时候, 一组日本物理学家应用东京大学原子核研究所的 750 MeV 电子同步加速器在软 X 射线 (SX) 区域的辐射作为连续背景, 进行 KCl 和 NaCl 的 Cl-L_{2,3} 吸收谱研究, 在氯的 2p 电子激发阈附近观察到由芯激子形成而产生的尖锐吸收谱线. 他们还得到一系列金属和合金 (Be、Al、Sb、Bi、Al-Mg) 的软 X 射线波段的吸收谱. 他们的工作是同步辐射应用于固体物理研究的开端.

受到这些先行性工作的鼓舞, 人们在世界各地的电子同步加速器上, 尝试进行了大量 VUV-SX 波段的吸收谱学实验研究, 得到许多令人振奋的结果, 而且把这种方法, 迅速应用到物理和化学与原子、分子、固体等许多有关的领域中. 直到今天, 同步辐射仍然是在真空紫外至软 X 射线波段最强的连续光源. 由于早期的电子同步加速器的能量较低, 由加速器弯转磁铁产生的同步辐射的实用波长限于 VUV-SX 范围, 较高通量的同步辐射 X 射线的产生要等到能量为几个吉电子伏量级的电子加速器建成之后才谈得到. 1965 年德国汉堡的 5GeV 电子同步加速器 (DESY) 建成, 那时人们认为对 DESY 提供的 X 射线波段同步辐射的性质与理论预言完全一致是理所当然的, 从此在较高能量的加速器上使用 X 射线波段同步辐射的研究也就开始了.

这样, 从 20 世纪 60 年代中叶开始, 在世界各地能量较高的电子同步加速器上普遍地开展了同步辐射的应用研究的第一波热潮. 同步辐射的优异性质, 使分处在十分广泛领域中的众多科技工作者看到一个巨大的机会, 越来越多的研究人员成为使用同步辐射进行他们本学科研究的用户. 由于这些研究都是在电子同步加速器进行高能物理实验时一种不可避免的负面产物的应用, 所以有相当一段时间被称为寄生 (parasitic) 应用, 加速器的这种产生同步辐射的运行模式也就称为寄生模式, 从字面就可以知道, 此称谓是不无贬义的. 后来人们把这些在做高能物理实验时引出同步辐射以供用户应用的加速器称为第一代同步辐射光源.

把同步辐射应用推向一个新阶段的事件是在 20 世纪 60 年代储存环的建成. 储存环本来是为高能物理研究而发展起来的设备, 传统的高能物理实验通过用加速到高能量的粒子轰击固定靶来产生新粒子和探索微观世界的新现象, 但是这种实验模式在能量方面看是低效的, 因为只有入射粒子和靶粒子二者质心系的能量才是它们相互作用的有效能量, 对于质量为 m 的静止靶粒子, 虽然入射粒子被加速到很

高的能量 E , 但在质心系中发生碰撞的系统能量 $\propto (mE)^{1/2}$, 即有用能量只占加速器达到的能量 E 的小部分. 1956 年 Kerst 等以及 O'Neill 建议用具有高能量的入射粒子束和靶粒子束的对撞来克服这个缺点. 这种想法的可行性在 20 世纪 60 年代初随着储存环的建成得到证实, 从此, 对撞机在高能物理实验中开辟了一个新方向, 发挥了十分重大的作用. 储存环的出现, 也迅速引起了在广大科学技术领域中为数众多使用同步辐射的研究群体的注意, 它提供的相当稳定的电子束流、在各个频段上可调可控的同步光谱分布以及超高真空的工作环境, 使人们看到一个十分有利的、推进他们的科研应用的先进光源——专用同步辐射光源的前景.

随着在日本东京大学第一个专为产生同步辐射用的 400MeV 储存环的建成, 推动了在世界各地新一轮建造专用同步光源、成立同步辐射应用中心的热潮. 这些新中心的储存环或是由退役的高能加速器改造而成, 或者索性就是从头开始, 为优化同步辐射的产生和实验特点而设计和建造的. 从加速器的观点看来, 优化光源当时最重大的进展是 1976 年提出的以低电子束发射度得到高同步光亮度的磁铁聚焦结构 (chassman-green lattice). 这些同步辐射中心的建成标志着同步辐射专用运行时代的到来. 它们被称为专用同步辐射设施, 或第二代同步辐射设施, 而把依附于高能物理实验运行的寄生运行的设施称为第一代同步辐射设施, 它们大多建于 1965~1975 年, 而第二代同步辐射设施则大多建于 1975~1990 年. 这个潮流的出现, 有两个突出的背景: 一是同步辐射用户群在各个学科领域中的迅速成长, 他们对机时的要求很快就超出在高能物理中心里“寄生”运行的设施所能提供的能力; 二是同步辐射先进手段的迅速普及, 其用户来自空前广泛的科技领域, 从理工科的基础研究到应用研究部门, 甚至到工业的研发及质控部门, 其影响之大在当代大科学装置中是首屈一指的. 如此广泛众多的应用群体的参加, 使它很快就成为多学科融合与相互渗透的大平台, 这正是适应当代科技发展规律所要求的, 故很快就为各发达国家科技规划部门所认识, 予以大力支持. 许多第二代光源建造在已有的国立研究中心近旁, 如美国 Brookhaven 的国立同步光源 (NSLS)、英国 Daresbury 的同步辐射光源 (SRS)、日本筑波的光子工厂 (PF) 等.

逐渐地, 即使在第一代光源上, 和高能物理学家一同使用加速器中同步辐射产物的群体, 在人数和领域广度都超过前者, “寄生”一词更显不妥, 于是有人采用了“共生”(symbiotic) 一词. 这两个词都来自生物学, 当初引用“寄生”一词的人对 20 年后同步辐射装置上发展出今日的局面想有始料不及之感吧.

第二代光源发展的同时, 插入件磁铁的研制有着重大的进展. 所谓插入件磁铁, 简称插入件, 是一些极性在空间有周期性变化的磁体组件, 这些组件装置在存储环的直线段中, 电子在经过时走的路径是与磁场垂直的正弦形轨迹, 只要在直线段中插入件的磁场积分为零, 在该直线段之外电子的理想轨道将不受到影响. 插入件技术的发展及应用, 使同步辐射光源的发射度可以建造得非常小, 不但得到束流长期

稳定、亮度十分高的同步光,而且在偏振、相干性方面都有很优越的品质。从 20 世纪 90 年代开始出现了新一代大量使用插入件的新光源——第三代光源,如在 Grenoble 的欧洲同步辐射光源就装置了三十几条插入件光束线,在日本的 Spring-8 同步辐射光源装置了近 40 条插入件光束线。到 90 年代中期,全世界已建和在建的同步辐射中心约有 55 个,十多年过去,还是差不多这个数目,这是因为退役与改造、新建的装置数目大致达到平衡。这些中心的地理分布集中在欧洲、亚洲及北美洲。在中国现在共有四个:1991 年开始运行的北京光源 (BSRF) 属第一代同步辐射光源;1992 年开始运行的合肥光源 (NSRL) 属第二代同步辐射光源;1994 年开始运行的台湾光源 (SRRC) 以及 2007 年开始运行的上海光源 (SSRF) 属第三代同步辐射光源。

自同步辐射面世以来,同步辐射中心一直有着用户群体急剧增加、工作领域迅速开拓的特色。一方面,同步辐射平台的先进手段帮助用户开拓新的工作前沿;另一方面,用户专家又对平台在光源品质、实验方法、束线更新等发展提出方向与要求,促进平台工作能力的提高。这两个方面,都是以很高的速度进行的。因此,本书在这两个方面兼具检索性与引导性的、由用户专家与光源装置专家密切合作共同撰写的,这是一件具有高度战略意义的事。首先,它将帮助众多在本领域中的高手掌握这种先进的手段用于他们从事的研究,因而有着可贵的参考价值;其次,对于有志进入同步辐射应用领域的年轻人来说,它将带引他们穿过浩如烟海的文献,尽快进入这个领域;另外,总结用户就同步辐射平台在装置 (instrumentation) 与方法学 (methodology) 上的需求建议,将更有力促进平台在诞生之日起就不断发展与创新。

我谨向该书的编者与全体作者致深挚的敬意。

中国科学院高能物理研究所

2011 年 1 月 20 日

前 言

1895 年 11 月 8 日德国科学家伦琴 (Röntgen) 发现 X 射线, 开创了科学技术的新纪元. 不久, Larmor、Lienard 和 Schott 等的出色工作, 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 20 世纪四五十年代, 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, 能量损失的主要原因是电磁辐射, 因此, 40 年代同步辐射被认为是限制加速器达到高能量的主要障碍.

1947 年 Elder 等在美国通用电气实验室的 70MeV 电子同步加速器上观察和研究了同步辐射的性质, 标志着一种新的光源时代开始. 20 世纪 50 年代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 年代初开始了同步辐射应用可行性的研究, 很快同步辐射的应用进入了实用阶段.

同步辐射是指以接近光速运动的电子在磁场中做曲线运动时在切线方向发射出的电磁辐射. 由于这种辐射是在同步加速器上被发现的, 因而被命名为“同步加速器辐射”(synchrotron radiation), 在中国简称为“同步辐射”. 理论和实验结果表明, 同步辐射光源具有许多常规光源不具备的异常优越的特征, 如宽的频谱范围、高光谱亮度、高光子通量、高准直性、高偏振性以及具有脉冲时间结构等. 同步辐射光源的应用给科学技术发展提供了新的实验平台和新的途径. 一些常规光源认为不可能做的实验成为可能, 已经成为材料科学、生命科学、环境科学、物理学、化学、医药学、地质学等学科领域的基础和应用研究的一种最先进的、不可替代的工具, 并且在电子工业、医药工业、石油化工、生物工程和微纳加工等领域具有重要而广泛的应用. 现在同步辐射应用已被广泛认为是几乎所有学科不可缺少的分析工具, 有力地促进和推动科学技术的各个领域的发展, 成为当今最重要的光源之一.

20 世纪 60 年代开始, 发达国家逐步开展同步辐射的应用研究. 同步辐射光源的理论和技術日趋成熟和完善, 在科学技术研究领域显示出巨大威力. 随着科学研究的不断深入以及同步辐射技术和实验方法的发展和应用范围的不断开拓, 对同步辐射光源的要求也不断提高, 从 60 年代到目前, 同步辐射光源的发展已经历了三代, 并正在探索第四代光源. 第一代同步辐射光源“寄生”于高能物理实验用的电子储存环. 随着同步辐射光的巨大利用前景和需求的显现, 70 年代初, 专门用来产生同步辐射光的第二代同步辐射光源应运而生. 90 年代出现的第三代同步辐射则

是在此基础上实现低发射度电子储存, 并主要利用插入件来产生低发射度、高亮度的同步辐射, 其最高亮度与第二代同步辐射光源相比可提高上千倍。

迄今, 国际上已有 60 多台同步辐射光源投入运行, 正在建造和设计中的同步辐射光源有 10 多台。我国政府对同步辐射装置的发展给予高度的重视和支持, 发展尤堪称道, 从无到有, 从涉足到深入, 从仅求“占有一席之地”到足以展现世界同类光源的先进水平。目前, 我国有四个同步辐射装置: 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 (第一代同步辐射光源); 合肥国家同步辐射实验室 (NSRL) 于 1989 年建成、出光 (第二代同步辐射光源); 中国台湾同步辐射装置 (SRRC) 于 1991 年建成、出光 (第三代同步辐射光源); 上海光源 (SSRF) 于 2007 年 12 月 24 日出光, 并投入运行 (第三代同步辐射光源)。更为可喜的是, 上海光源的一期建设的光束线和实验站已经取得一批重要的科学成果, 二期线站建设方案已获国家批准; 北京光源也已经完成改造, 能量达 2.5 GeV, 并兴建了一些新的线站。新的、更为先进的第三代北京先进光源预研即将启动; 合肥光源也已经启动新一轮升级, 计划改造成更加先进的光源; 中国台湾新的第三代光源正在建造。可以肯定, 高速发展的中国同步辐射装置群对中国科学技术和国民经济的发展将起巨大作用。

本书是由国内三个同步辐射装置第一线的 40 多名业务骨干共同编纂而成。全面介绍同步辐射的产生、性质、加速器、光束线和实验方法、数据分析、应用实例以及国际发展趋势。既有基础理论、基本原理深入浅出的介绍, 也有实验装置和翔实的应用实例。力图理论联系实验、深入浅出, 而又不失其先进性、实用性和普适性, 全书共分 19 章。

第 1~4 章介绍同步辐射装置, 主要包括同步辐射源、同步辐射原理、同步辐射光线束和同步辐射探测器。使读者对同步辐射装置的结构、同步辐射的特性、同步辐射装置的国内外现状以及同步辐射与物质相互作用有初步的了解。

第 5~19 章介绍同步辐射实验方法, 主要包括中国内地三个同步辐射装置目前已有的部分光束线站、实验方法及应用实例。除了总结作者和用户在研究中解决该领域前沿问题的实例外, 还尽量收集近年来国内外相关的重要结果, 以供读者参考。使读者初步掌握研究所需要的实验条件、实验装置配置、实验数据处理分析以及国际研究动态等。

同步辐射装置是多学科的实验平台, 涉及的学科内容很广。本书仅集中介绍同步辐射装置的特性、实验方法及应用实例。由于各学科都有本学科的专业术语和英文符号, 为了尊重各学科的特点和习惯, 在本书撰写中, 我们保留了各学科惯用的英文符号和定义, 以便于专业读者的阅读。

本书可供从事材料科学、生命科学、环境科学、物理学、化学、医药学、地质学等学科领域的高等院校和科研院所的教师、科研人员和工程技术人员以及研究生

目 录

序 前言

上 册

第 1 章 同步辐射源	刘祖平	1
1.1 同步辐射源的发展		1
1.1.1 引言 —— 同步辐射的定义和早期的探索		1
1.1.2 同步辐射源的起步阶段和同步辐射的优良特性		3
1.1.3 同步辐射源发展的第一波热潮		8
1.1.4 同步辐射源发展的第二波热潮		9
1.1.5 当今世界同步辐射源的发展趋势		12
1.2 同步辐射源的工作原理		16
1.2.1 电子储存环		16
1.2.2 电子直线加速器		46
1.2.3 增强器		55
1.2.4 束流传输线		57
1.3 国外同步辐射源简介		60
1.3.1 美洲		61
1.3.2 欧洲		63
1.3.3 亚洲		68
1.3.4 大洋洲		71
1.4 北京、合肥、上海光源的特点		71
参考文献		74
第 2 章 同步辐射原理	刘祖平 高琛	76
2.1 同步辐射谱的产生		76
2.1.1 来自弯转磁铁的同步辐射谱		76
2.1.2 来自扭摆器的同步辐射谱		88
2.1.3 来自波荡器的同步辐射谱		90
2.1.4 同步辐射的脉冲特性		99

2.2 同步辐射谱与物质的相互作用	101
2.2.1 介质在 (软)X 射线波段的折射率	103
2.2.2 (软)X 射线的全反射	104
2.2.3 折射、反射时 (软)X 射线偏振态的改变	104
2.2.4 (软)X 射线的吸收	106
2.2.5 (软)X 射线引起的荧光和俄歇电子	107
参考文献	109
第 3 章 同步辐射光束线	乔山 111
3.1 光束线及前端区的一般介绍	111
3.1.1 概论	111
3.1.2 前端区	111
3.1.3 辐射防护和人身安全联锁系统	112
3.1.4 真空系统	113
3.2 光的聚焦与偏转	113
3.2.1 反射镜的一般介绍	113
3.2.2 费马原理	115
3.2.3 球面和超环面反射镜	119
3.2.4 面形误差对聚焦的影响	120
3.2.5 双反射镜系统	121
3.2.6 波带片	123
3.3 光栅单色器及其束线	125
3.3.1 光栅衍射及相应的费马原理	125
3.3.2 光栅单色器理论	128
3.3.3 光栅单色器的像差及能量分辨率	129
3.3.4 垂直入射单色器	132
3.3.5 SX-700 单色器	133
3.3.6 龙型单色器	134
3.3.7 变线距光栅单色器	135
3.3.8 光栅光束线的设计	136
3.3.9 真空紫外光束线的性能评价	137
3.4 晶体单色器及其光束线	140
3.4.1 晶体衍射理论简介	140
3.4.2 平晶单色器	143
3.4.3 弯晶单色器	151
参考文献	152

第 4 章 同步辐射探测器	刘鹏 黎忠	153
4.1 同步辐射实验与探测器技术概述		153
4.2 探测器在同步辐射应用研究中的重要地位		153
4.2.1 同步辐射实验的关键角色		153
4.2.2 同步辐射实验效率的瓶颈		154
4.3 同步辐射技术及发展对探测器的需求		155
4.4 同步辐射实验中各种主要探测器的介绍		156
4.4.1 气体探测器		156
4.4.2 闪烁探测器		158
4.4.3 固体探测器		159
4.4.4 成像板		160
4.4.5 电荷耦合器件探测器		161
4.4.6 硅微条探测器		162
4.4.7 像素阵列探测器		164
4.5 同步辐射光束位置监测器简介		164
4.5.1 光敏丝型 XBPM		165
4.5.2 刀片型 XBPM		166
4.6 同步辐射探测器技术的发展		168
4.6.1 高灵敏度大面积探测器		168
4.6.2 高效探测元的发展		169
4.6.3 快速成像相机技术		169
4.6.4 时间分辨复合型像素计数探测器		170
4.6.5 能量分辨二维探测器		170
参考文献		171
第 5 章 同步辐射X射线衍射、异常衍射		
..... 麦振洪 吴忠华 潘国强 贾全杰		173
5.1 实验装置		173
5.1.1 光束线配置		173
5.1.2 光束线指标		177
5.1.3 实验站设备		179
5.1.4 实验站参数		181
5.2 高分辨 X 射线衍射		182
5.2.1 X 射线衍射理论概述		182
5.2.2 X 射线衍射实验方法		187
5.2.3 测量分辨率分析		189

5.2.4	粉末衍射实验数据分析	193
5.2.5	应用实例	195
5.3	掠入射衍射	197
5.3.1	掠入射衍射理论概述	197
5.3.2	实验方法	200
5.3.3	实验数据分析	201
5.3.4	应用实例	201
5.4	异常衍射精细结构	203
5.4.1	异常衍射精细结构理论概述	203
5.4.2	DAFS 实验方法	210
5.4.3	DAFS 谱线分析方法	211
5.4.4	应用实例	212
	参考文献	216
第 6 章	同步辐射 X 射线反射、散射	220
6.1	实验装置	221
6.1.1	光束线的配置	221
6.1.2	实验站设备	223
6.2	X 射线反射	225
6.2.1	X 射线反射理论概述	225
6.2.2	实验方法	228
6.2.3	实验曲线分析和理论拟合应用实例	229
6.3	X 射线漫散射	240
6.4	非弹性 X 射线散射	246
6.4.1	简介	246
6.4.2	非弹性 X 射线散射理论基础	247
6.5	X 射线磁散射	250
6.5.1	非共振磁 X 射线散射理论	250
6.5.2	磁共振 X 射线散射	254
6.6	实验方法	255
6.6.1	同步辐射非弹性 X 射线散射实验方法	255
6.6.2	超高分辨非弹性 X 射线散射实验	256
6.6.3	实验数据分析	257
6.6.4	应用实例	262
	参考文献	269

第 7 章 同步辐射小角 X 射线散射 ·····董宝中	274
7.1 引言·····	274
7.2 实验装置·····	274
7.2.1 光束线的配置·····	274
7.2.2 实验站设备·····	275
7.3 实验方法·····	281
7.3.1 样品的制备·····	281
7.3.2 实验方法·····	282
7.4 实验数据分析·····	284
7.4.1 数据的初处理·····	284
7.4.2 小角散射原理·····	286
7.4.3 粒子形状和大小·····	291
7.4.4 相边界·····	296
7.4.5 分形·····	297
7.4.6 相关函数和距离分布函数·····	298
7.5 应用实例·····	299
参考文献·····	306
第 8 章 同步辐射 X 射线生物大分子结构分析 ·····董宇辉 高增强	309
8.1 引言·····	309
8.2 实验方法·····	310
8.2.1 同晶置换法·····	312
8.2.2 反常散射法·····	315
8.2.3 反常散射解决相位问题的原理·····	317
8.3 应用实例·····	320
8.4 新的方法·····	324
8.4.1 与其他方法的结合·····	324
8.4.2 基于自由电子激光的结构解析方法·····	331
参考文献·····	332
第 9 章 同步辐射 X 射线吸收谱精细结构 ·····	
韦世强 孙治湖 李媛媛 吴自玉 潘志云 闫文盛 谢亚宁 胡天斗	335
9.1 引言·····	335
9.2 XAFS 基本原理·····	336
9.2.1 单散射理论·····	336
9.2.2 多重散射理论·····	338
9.2.3 EXAFS 数据分析·····	340

9.3	XAFS 实验技术	344
9.3.1	透射 XAFS 测量法	346
9.3.2	荧光 XAFS 测量法	348
9.3.3	电子产额测量法	350
9.4	XAFS 的应用	351
9.4.1	纳米结构材料	351
9.4.2	半导体材料	353
9.4.3	磁性材料	355
9.4.4	高温超导和巨磁阻材料	360
9.4.5	催化剂和太阳能电池材料	362
9.4.6	金属蛋白质	364
9.5	XAFS 新技术	367
9.5.1	原位 XAFS	367
9.5.2	时间分辨 XAFS	369
9.5.3	微区 XAFS	372
9.6	展望	374
	参考文献	375
第 10 章	同步辐射 X 射线荧光分析	黄宇营 魏向军 381
10.1	同步辐射 X 射线荧光分析原理	381
10.1.1	同步辐射 X 射线荧光分析发展简述	381
10.1.2	国内外 SR-XRF 装置简要进展	382
10.1.3	X 射线荧光分析原理简述	382
10.1.4	同步辐射光源及 SR-XRF 特色	387
10.2	同步辐射微束荧光分析方法	388
10.2.1	实验装置	388
10.2.2	实验数据分析	394
10.2.3	应用实例	395
10.3	同步辐射 TXRF 分析方法	399
10.3.1	同步辐射 TXRF 简介	399
10.3.2	TXRF 理论	401
10.3.3	SR-TXRF 分析方法及其特点	404
10.3.4	SR-TXRF 的最新进展及展望	407
10.3.5	SR-TXRF 实验装置及应用简介	408
10.3.6	实验数据分析	413

10.4 同步辐射 XRF 相关三维分析方法	415
10.4.1 X 射线荧光 CT	415
10.4.2 X 射线荧光全场成像	416
10.4.3 共聚焦 X 射线分析	419
10.4.4 掠出射 X 射线荧光	421
10.5 小结	423
参考文献	424
第 11 章 同步辐射光电发射技术	
徐彭寿 奎热西·依布拉欣 徐法强 朱俊发	429
11.1 光电子能谱技术	429
11.1.1 引言	429
11.1.2 光电子能谱的原理	433
11.1.3 软 X 射线光电子能谱	444
11.1.4 硬 X 射线光电子能谱	453
11.1.5 光电子能谱实验装置	460
11.2 光电子衍射技术	462
11.2.1 引言	462
11.2.2 光电子衍射的基本原理	463
11.2.3 光电子衍射的实验方法	469
11.2.4 光电子衍射技术的应用	475
11.3 光电子显微技术	483
11.3.1 引言	483
11.3.2 基本原理	483
11.3.3 PEEM 仪器和工作模式	487
11.3.4 光电发射电子显微镜在磁性材料研究中的应用	490
11.4 在半导体表面和界面研究中的应用	495
11.4.1 引言	495
11.4.2 SiC 表面的重构和氧化	496
11.4.3 Au/GaN(0001) 界面	500
11.4.4 ZnO/SiC 异质界面的形成	506
11.5 在表面分子吸附和催化中的应用	513
11.5.1 表面吸附与催化	513
11.5.2 同步辐射光电子能谱技术在表面吸附和催化研究中的优势	515
11.5.3 同步辐射光电子能谱在表面吸附及催化研究中的应用举例	517
11.5.4 展望	532

参考文献	534
------------	-----

下 册

第 12 章 同步辐射角分辨光电子能谱	周兴江 刘国东 孟建桥 赵林 551
12.1 角分辨光电子能谱的工作原理	553
12.2 角分辨光电子能谱实验装置	559
12.3 角分辨光电子能谱的理论描述	574
12.4 实验数据分析	581
12.5 角分辨光电子能谱的应用	586
12.6 结束语	609
参考文献	610
第 13 章 同步辐射 X 射线成像	
朱佩平 吴自玉 肖体乔 田扬超 余笑寒 储旺盛 李恩荣 洪友丽 622	
13.1 引言	622
13.2 光传播的物理性质	626
13.3 X 射线投影成像	645
13.4 X 射线“透镜”成像	684
13.5 X 射线探针扫描成像	712
13.6 相干 X 射线无透镜成像	732
参考文献	756
第 14 章 同步辐射软 X 射线显微术	邵仁忠 陈敏 许子健 764
14.1 引言	764
14.2 软 X 射线显微术的成像机理	765
14.3 软 X 射线显微术	767
14.4 上海光源软 X 射线谱学显微光束线站	775
14.5 TXM 和 STXM 的应用	780
14.6 结束语	802
参考文献	802
第 15 章 同步辐射材料结构分析高压技术	刘景 806
15.1 实验装置	806
15.2 实验方法	816
15.3 实验数据分析	825
15.4 应用实例	830
参考文献	836