

同步辐射及其应用研究

Synradiation and Its Application Research

梁岫如

(中国科学院高能物理研究所, 高级工程师

北京 100080)

同步辐射光源是基于高能电子环形加速器而发展起来的新型人造光源。光源装置及其应用在近30年里得到了迅速发展。我国现有的同步辐射装置为80年代水平,在许多领域开展了初步应用。本文简要介绍同步辐射的产生、特性以及我国同步辐射装置的发展和应用情况。

一、同步辐射的产生及特性

同步辐射是存在于高能电子同步加速器和电子储存环中的电磁辐射现象。科学家在50年代的理论研究中描述了宇宙线中的高能电子在进入地球磁场后所产生的辐射性质,作出了辐射强度、角分布、波谱、极化等特性分析。粒子加速器专家也阐述了高能电子在环形加速器中辐射性质,指出了电子能量丢失的原因。通过对电子运动的计算,可以得到同步辐射功率、辐射张角、光子特征波长和特征能量等参数。

1947年,美国通用电气公司建成了一台70兆电子伏能量的电子同步加速器,在调束时通过玻璃真空盒观察到在电子前进的方向有兰白色光出现。当改变电子能量到30~40兆电子伏时,光的颜色由黄色变为红色。这表明光的波长与电子能量有关,也与理论分析结果一致。科学家们确认这就是电子的辐射,称做“同步辐射”。

经过60年代的继续努力,不但认识到如何补偿环形加速器中电子能量的损失,同时也发现同步辐射是一种具有优异性能的光源,它为人认识物质微观世界开辟了一条新路。

同步辐射的优点可以归纳为:(1)光亮度高、通量大、准直性好,同步辐射集中在沿切线方向很小的立体角内。(2)光谱范围宽且连续,可以根据需要进行选择。(3)具有高度稳定性。在高性能的储存环中,电子得到长时间稳定循环运动,电子束能量、流强、轨道位置等可自动跟踪控制,保持发光点位置稳定。(4)具有偏振性。在电子轨道平面上的辐射为圆偏振光,偏离轨道为椭圆偏振光。利用这个特点,

在做微量元素荧光分析时,有很高的检测限。(5)具有时间结构。同步光脉冲宽度决定于电子束团长度,光脉冲间隔取决于电子脉冲的间隔。(6)高清洁环境。同步辐射在真空环境里传播,有利于进行表面物理研究、微量元素测定、亚微米电路光刻等,不必耽心光源对环境和样品的污染。(7)可精确计算。由粒子加速器的理论公式可精确计算出同步光性能参数,这对分析同步辐射实验数据具有重要意义。

同步辐射光源集许多优点于一身,开发同步光源的特殊性能应用于现代科学和技术的应用研究,不但要建设高性能的光源,还要有高新技术支持的光束传输系统及实验装置。因此可以说,同步辐射光源的建造与应用,是科学技术进入新时代的标志之一。

二、同步辐射光源的发展和应用

在国际上同步辐射光源自50年代到现在经历了三个发展阶段。

第一代同步辐射光源是利用正负电子对撞机储存环上的弯转磁铁作为发光元件。储存环的工作参数优化在正负电子的对撞运行模式上,同步辐射应用处于寄生状态,因此对同步光性能的高要求必然受到限制。世界上兼做同步辐射光源的正负电子对撞机有十几台,它们在同步辐射特性的研究和早期应用中发挥了重要作用,有些至今仍为“一机两用”,有的则在完成高能物理研究后改做专用光源。

70年代建造了专用同步辐射光源,在电子储存环设计中考虑到改善电子束流的品质和引入了插入元件(扭摆磁铁与波荡器),以提高同步光强度和特征能量。迄今国际上运行的同步辐射专用光源亦即第二代同步辐射光源有20多台。80年代末出现了所谓第三代同步辐射光源,其特点是电子束流具有更高的品质和以更高性能的插入件作为主要发光元件,因而将同步光的亮度指标又提高了几个数量级。已建成并投入运行的第三代同步光源分布在

美国、法国、意大利、韩国、我国台北等,正在建造和设计中的有 10 多台,分别在德国、美国、日本、印度、巴西等。

三、我国同步辐射的发展与现状

我国(包括台湾)自 1970 年开始兴建同步辐射装置,先后建成了 3 个同步辐射科学实验基地,即北京同步辐射装置、合肥国家同步辐射实验室、台北新竹同步辐射研究中心。

北京同步辐射装置(BSRF)是北京正负电子对撞机的一部分,于 1990 年开始建设,1995 年竣工。正负电子对撞机的储存环兼做同步辐射光源,具有兼用和专用两种工作模式,在专用模式时,电子能量为 2.2 吉电子伏。在储存环上有一个插入件(电磁扭摆器 4W1)和新建成一个永磁扭摆器(3W1,尚未投入使用),可引出 3~20 千电子伏的硬 X 射线。在 4W1 窗口共引出 3 条光束线,连接着 5 个实验站,每年有 2~3 次专用光时间(约 45 天),开展形貌学、X 射线荧光分析、原子近边精细结构(EXAFS)、漫散射和高压物理等的实验和研究。两个弯转磁铁窗口(3B1 和 4B9)共引出 4 条光束线,连接 5 个实验站,开展小角散射、衍射、光电子能谱分析、生物光谱、软 X 射线光学和深亚微米光刻等研究(3W1 投入运行后,实验站的分布将有所调整)。BSRF 对用户开放,5 年来共为几十个单位的约 200 多个科研题目服务,涉及凝聚态物理、材料科学、表面物理、化工、高压物理、生物、生物与医药学、地矿与能源、软 X 光学、微电子技术等领域。

合肥同步辐射国家实验室(NSRL)于 1984 年到 1991 年建成了电子能量为 0.8 吉电子伏的电子储存环,属第二代光源,同步光在真空紫外和软 X 光波段,并建成了光化学、光电子能谱、时间分辨光谱、软 X 射线显微束和软 X 射线光刻等实验站。由于是专用同步辐射光源,它可以为用户提供充足的用光时间。

台湾新竹科学园区建成的同步辐射研究中心(SRRC)有一台电子能量为 1.3 吉电子伏的第三代光源,计划开展气相光谱学、光电子谱学、光化学、X 射线荧光分析、吸收光谱学、时间分辨光谱学、软 X 射线光刻技术和软 X 射线显微束的研究。该中心近来对软 X 射线深度光刻技术给予了高度重视。

四、BSRF 上开展的同步辐射应用研究

BSRF 自对用户开放以来,不断改进和完善设备及研究实验的方法,支持了一批国家重点项目和自然科学基金课题。下面例举已取得的部分研究成果。

(1)南京大学固体微结构物理实验室蒋树声组开展铁弹晶体畴结构与相变研究,在 KTN、KNsBN 晶体中观察到铁电畴结构组态及相变信息。

(2)中科院物理所麦振洪组用 X 射线白光形貌方法研究 C_{60} 单晶生长条件及低温相变,首次发现了从 295K 到 249K 时的相变过程。

(3)北京大学物理系王文采组利用 EXAFS 谱学技术开展了新型功能材料氟化物玻璃的结构研究。

(4)中科院山西煤炭化学所顾永达组开展金属和含碳物质相互作用的研究,为气体净化、煤焦燃烧和气化的催化机理提供重要信息。他们研制的催化剂已在工业上得到应用。

(5)北京大学物理系吴思诚教授与 BSRF 光电子谱实验站合作,开展新型材料 C_{60} 及 $C_{60}F_{48}$ 等掺杂 C_{60} 的作用机理、单晶表面态等研究。

(6)BSRF 姜晓明组通过对非晶周期和准周期多层膜以及非晶薄膜的 X 射线非镜面散射的实验研究,进一步对界面、表面横向结构以及薄膜生长动力学过程进行了实验研究,在准周期多层膜中观测到具有准周期特性。

(7)兵器部 211 所对碲镉汞晶体缺陷的研究,对研究器件性能和提高成品率有指导意义。

(8)北京大学化学系谢有畅组采用透射 XAFS 方法研究了以 $\gamma-Al_2O_3$ 分子筛为载体的有机催化剂的结构。结果表明,多相催化剂的活性成份具有在载体表面自发分散的倾向,进而为阐述催化剂的作用机理、筛选新的催化剂提供理论指导。

(9)中科院物理所车荣钰组研究高温超导材料 $HgBaCaCuO$ 在高压下相变,发现了材料压缩率各向异性的现象。

(10)南开大学周永治组研究得到了锌合血清蛋白的 ZnK 吸收边的荧光 XAFS 谱,研究微量元素周围原子配位结构,为研究生物大分子结构与功能的关系提供一个新的手段。

(11)国家地质实验测试中心安庆骧组与 BSRF 合作完成了国家自然科学基金资助项目“同步辐射 X 射线扫描成分分析在地学中的应用研究”。

(12)湖北江汉石油学院李葵发组用 X 射线荧光分析测定原油中微量元素成分和含量,完成了对西部油田的原油、生油岩、油田水的微量元素分析,为塔里木盆地油田原油分类提供了依据。

(13)中科院微电子中心和高能所光刻联合实验组开展了 X 射线光刻工艺研究和微结构器械工艺研究。他们以开发深亚微米级大规模集成电路技术、超高速集成电路技术、微波器件技术和微结构技术等为目标,现已完成第一阶段工作。

(14)中科院开展软 X 射线光学和应用研究,他

(下转第 12 页)

大学在黄淮海平原的曲周试验区研究提出了盐渍化浅层咸水泛滥平原类型综合治理的农田工程系统、区域水盐监测预报和调节系统、优化施肥决策—咨询系统、农林牧综合发展的农田生产系统等,使面积为2 000公顷试验区的生态环境和生产条件得到了极大的改善,为区域粮食高产、稳产及农业持续发展奠定了良好的基础。

2. 以“高产、优质、高效”为核心,形成了一批促进农业持续发展的综合治理模式

“区域综合治理”攻关项目,布局遍及大半个中国,规模宏大。它以改造中低产田、提高土地生产力为重点,以合理开发利用农业自然资源、改土治水、培肥施肥、农牧结合、农林牧综合发展、保持水土、采用良种良法耕作栽培的“高产、优质、高效”生产技术研究为核心,建立良性发展的生态经济体系、综合治理模式及配套技术体系。为了达到“长期根治,本表兼顾,提高肥力,持续增产”的目的,采取工程、生物及农业技术相结合的方法综合治理中低产田,消除制约全区的障碍因子。并从孤立和片面的土壤改良,向整体化和系统化的区域治理与农业持续发展的方向前进。在配套技术上,通过劳力精巧投入与精湛的农业工艺及农业生态工程技术相结合,在单位面积上获得高额的生产力,再通过物质循环再生利用与深度开发及加工,使产品有较大幅度的增值,使农业生产达到持续“高产、优质、高效”,农村经济持续增长。黄淮海平原盐渍土的改良正是在整个区域的综合治理中进行的并在大范围内取得成效。它与“引江”、“引黄”,跨流域调水,开发地下水和农牧综合发展模式相结合,极大地提高了区域农业生产能力,促进了黄淮海平原的农业发展和农村经济的全面高涨。国家“七五”“区域综合治理”攻关项目共建有34个综合治理试验区,提供

包括农作物高产栽培规范化、土壤培肥、经济施肥、整治旱涝盐渍的水利工程、节水农业、湿地农业、农牧结合、吨粮田模式在内的140个配套技术,为我国区域农业开发和农村经济持续稳定发展提供了多种可供借鉴的样板。

3. 适度的无风险投入技术

无论是投放农业的劳力、能源或其它物质,中国式生态农业及持续农业要求尽可能提高对各种投入的转化利用效率,尽可能采用高效、无毒的生物制品,采用新的种植、灌溉、施肥、喷药等作业一次完成或一机多用的农业机械,以及合理的“栽培投入”。区域农业综合治理中所采取的适度无风险投入技术包括:(1)广泛地采用高产、低耗、高净收益及抗病虫、耐病虫的作物品种。不仅谋求高产,获得较高的净收益,而且可减少(或避免)化学制品的使用。(2)在高度集约化条件下,建立区域有机—无机肥配合及平衡经济施肥技术体系,研制应用了生物有机无机复合肥。(3)尽量采用高效、低毒、低残留的化学防治技术,最大限度地利用赤眼蜂、苏去金杆菌、白僵菌、植物弱毒疫苗 N_{14} 和 S_{12} 、农用抗生素、病菌(病原体)、捕食昆虫、寄生动植物(害虫天敌)等有益生物相结合的综合生物防治技术,防治病虫害;利用农业、机械、人工除草相结合的综合技术防治农田草害。(4)应用节水综合技术,推行节水管理、节水灌溉、节水栽培农业技术,“排、蓄、用”相结合。(5)研究探索光解地膜技术。(6)合理利用多种栽培技术措施与耕作技术,采取免耕法与少耕法。

综上所述,我国农业的发展正面临着严峻的挑战。集约持续农业(Intensive-Sustainable Agriculture),即中国式生态农业,应成为我国未来农业发展的重要抉择。
(责任编辑 孙立明)

(上接第27页)

们的多层膜技术研究和开发获得了成功,并与中国工程物理研究院合作,开展软X光探测器标定的研究。

五、我国同步辐射发展展望

中国科学院组织了“九五期间”同步辐射发展的研讨,大体构想是充实和完善现有装置,提高支持应用的能力,并新建一台高性能第三代光源。

由于北京同步辐射装置受到一机两用的制约和合肥同步辐射装置建设不足等,我国的同步辐射光源和应用水平与国际上有较大的差距。在我国科学技术发展的“九五”计划中,拟列入NSRL扩建工程和在�上海建造一台高性能的新光源(SSRF)。北京

同步辐射装置将进行进一步的技术改造以支持和开拓多学科的应用研究。

新光源建设目标是力求达到更高的光亮度,光谱向硬X射线波段扩展,具有高的稳定性和使用效率。为此,在电子储存环、光束传输、实验方法和装置等方面都必须具有新的技术要求。电子束能量选择在2.0~2.5吉电子伏能区。在储存环上采用部分超导弯转磁铁和较长插入件做发光元件,可在很宽的波段范围内获得高通量X射线。它将为凝聚态物理、材料科学、化学、原子分子和团簇物理、核探测、地球科学、生命科学、医学和医药学、环境科学、微电子学及微机械技术等领域在21世纪的发展提供高性能的研究手段。
(责任编辑 肖庆山)