

全国核技术学术讨论会

论文选编

《核技术》编辑委员会编

99
上海科技出版社出版

内 容 提 要

本书汇集了1980年11月在上海召开的首届全国核技术应用学术讨论会的论文共34篇。它反映了近年来核技术在物理、化学、生物、天文、地学、工业、地质勘探、矿冶、材料科学、农业、医学、考古和环境保护等方面应用研究中发展的新方法、新原理、新装置及其取得的主要成果。

本书可供在物理、化学、生物、天文、地学、工业、地质勘探、矿冶、材料科学、农业、医学、考古和环保等方面从事同位素与射线等核技术研究应用的广大科技工作者以及大专院校有关专业的师生参考。

全国核技术学术讨论会论文选编

《核技术》编辑委员会编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海市印十二厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 6 字数 186,000

1981年8月第1版 1981年8月第1次印刷

印数 1—2,300

统一书号: 15119·2156 定价: (科五)0.85元

目 录

正电子湮灭技术·····	王蕴玉(1)
同步辐射研究和同步光源·····	何多慧(7)
BF-5 电子直线加速器的初步应用 ·····	王炳林(15)
中微子技术·····	施士元(20)
离子束技术在金属研究中的应用·····	李恒德 李文治(25)
核探针和同步辐射的应用展望·····	李民乾 张家骅(35)
中(低)能加速器的应用·····	冯锡璋(40)
热中子散射应用简介·····	杨 楨(42)
概谈核技术在有色金属矿山中的部分应用·····	东乃良 邹恩滕(45)
核医学的近代进展·····	赵惠扬(50)
Ge(Li) γ 能谱测井·····	赵景岐(55)
天然放射性示踪探测地下水源·····	金可则(60)
核技术在地质学和地球物理勘探中的若干应用·····	程业勋(65)
背散射技术在半导体中的应用·····	中国科学院半导体所、高能物理所背散射协作组(70)
离子束的非半导体应用·····	王有玕(70)
沟道效应进展·····	郭华聪(71)
核技术在原子物理中的应用——束-箔光谱学 ·····	刘家瑞 于桂菊 刘万银(72)
碳的束箔光谱、能级寿命和跃迁几率·····	刘家瑞 于桂菊 刘万银(73)
放射性同位素示踪法在电子工业中应用的某些进展·····	杨植震 唐静娟(74)
利用加速器的超灵敏质谱计·····	俞安孙 蒋崧生(75)
回旋加速器上氙年代测定——高能质谱技术的一个应用·····	周善铸 潘浩昌 林俊英 吴介征(76)
中子照像的发展及其在工业中的应用·····	清华大学核能研究所中子照相研究组(77)
光子激发能量色散 X射线分析及其应用·····	陈志祥(78)
二维漂移室·····	张锦添 谭继廉 张聿照 颜家骏(79)
某些金属和非金属材料的氟化研究 ·····	杨植震 叶昌洲 李 岚 朱蒙培 徐金生 吴惠元 马玉龙 黄湘泰 黄林根(81)
中子计及其应用·····	刘圣康(82)
用热释光法(TL)测定吉林陨石的温度梯度·····	刘京发 刘顺生 王维达(82)
固体径迹探测器及其应用·····	崔浣华(83)
利用扰动角关联方法研究生物大分子辐射损伤的机理·····	倪新伯 徐金龙 金汉生 尹端沚 胡妙君(84)
电子自旋共振在放射生物学中的应用·····	吕国刚 常自持(86)
用正电子湮灭技术测量不锈钢中的位错密度·····	王振杰 彭郁卿 袁鹤令 王景成(87)
近年来光子散射分析法在医学应用中的进展·····	刘守铮(88)
示踪原子在电化学研究中的某些应用·····	庄国顺 何阿弟 唐静娟 郁祖湛 张志炳(89)
用 β 射线测量火箭级间分离姿态的装置·····	臧德鸿 邵其銓 神承复 胡瑞娟(90)
* * * * *	
上海原子核研究所零功率装置已运行五年·····	李秀岩 陈福根(92)

Contents

The positron annihilation technique.....	Wang Yunyu (1)
Synchrotron radiation research and synchrotron light source.....	He Duohui (7)
Preliminary applications of BF-5 electron linear accelerator.....	Wang Binglin (15)
Neutrino technology.....	Shi Shiyuan (20)
Applications of ion beams in metal research.....	Li Hengde and Li Wenzhi (25)
Application prospect of nuclear microprobe and synchrotron radiation	Li Minqian and Zhang Jiahua (35)
Application of medium(low) energy accelerators.....	Feng Xizhang (40)
Thermal neutron scattering.....	Yang Zhen (42)
Some applications of nuclear techniques in nonferrous mines.....	Dong Nailiang and Zou Enteng (45)
Recent advances in nuclear medicine.....	Zhao Huiyang (50)
Gamma ray spectral well logging by Ge (Li) detector.....	Zhao Jingqi (55)
Detecting underground water source with natural radioactivity as the tracer.....	Jin Keze (60)
Some applications of nuclear techniques to geology and geophysics.....	Cheng Yexun (65)
A study of semiconductor material by ion beam backscattering.....	The Ion Beam Backscattering Associated Group, Semiconductor Institute and High Energy Physics Institute, Academia Sinica (70)
Applications of ion beams to non-semiconductor.....	Wang Yougan (70)
Latest developments of the channeling effect.....	Guo Huachong (71)
Beam-foil spectroscopy.....	Liu Jiarui, Yu Guiju and Liu Wanyin (72)
Beam-foil spectra, radiative-lifetimes and transition probabilities of carbon	Liu Jiarui, Yu Guiju and Liu Wanyin (73)
Some applications of radioactive tracers in semiconductor technology	Yang Zhizhen and Tang Jingjuan (74)
Ultra-sensitive mass spectrometry employing an accelerator.....	Yu Ansun and Jiang Songsheng (75)
Tritium dating with a cyclotron	Zhou Shanzhu, Pan Haochang, Lin Junyang and Wu Jiezheng (76)
The development process of neutron radiograph(N. R.) and its industrial application	The N. R. Group of INET of Qinghua University (77)
Photon-excited X-ray fluorescence analysis and its application.....	Chen Zhixiang (78)
A two dimensiond drift chamber.....	Zhang Jintian, Tan Jilian, Zhang Yuzhao and Yan Jiajun (79)
A study of kryptonation of some metallic and nonmetallic materials	Yang Zhizhen, Ye Changzhou, Li Lan, Zhu Mengpei, Xu Jingsheng, Wu Huiyuan, Ma Yulong, Huang Xiangtai and Huang Lingen (81)
Neutron gauge and its applications.....	Liu Shengkang (82)
The measurement of the temperature gradient produced in Jilin meteorite by thermoluminescence	Liu Jingfa and Liu Shunsheng (82)
Solid state track detectors and their applications.....	Cui Huanhua (83)
Using PAC to study the radiation damage of biological macromolecules	Ni Xinbo, Xu Jinlong, Jin Hansheng, Yin Duanzhi and Hu Miaojun (84)
Radiation biological applications of electron spin resonance.....	Lü Guogang and Chang Zichi (86)
The measurement of dislocation densities in stainless steel using positron annihilation	Wang Zhenjie, Peng Yuqing, Yuan Helin and Wang Jingcheng (87)
The advances in medical applications of photon scattering method in recent years	Liu Shouzheng (88)
Some applications of radioactive tracer in the investigation of electrochemistry	Zhuang Guoshun, He Adi, Tang Jingjuan, Yu Zuzhan and Zhang Zhibing (89)
A device for measuring the spatial orientation between two separating stages of a rocket by using β rays.....	Zang Dehong, Shao Qiyun, Shen Chengfu and Hu Ruijuan (90)

正电子湮灭技术

王 蕴 玉

(中国科学院高能物理研究所)

一、正电子湮灭技术的基本原理

1. 正电子湮灭寿命与发生湮灭局部的电子密度成正比

正电子是电子的反粒子。它遇到电子发生湮灭,在彼此相反的方向上释放出两条能量为 511keV 的 γ 射线。除了 2γ 湮灭,还有很少的几率发生 3γ 湮灭和单 γ 湮灭。

正电子在介质中发生 2γ 湮灭的几率 λ 与发生湮灭局部的电子密度 n_e 成正比:

$$\lambda_{2\gamma} = \pi \gamma_0^2 c n_e$$

式中 γ_0 是电子的经典半径, c 是光速,湮灭几率 λ 的倒数是正电子的寿命 τ 。故此,根据测量正电子在各种物质中的湮灭寿命,可以了解该物质电子密度,这对研究材料的内部状态很有价值。

正电子在稀薄气体中的湮灭寿命可达 10^{-7} 秒,在大多数固体中其寿命范围为 1×10^{-10} 到 3×10^{-9} 秒。在物质发生相变、结晶度改变以及辐照引起损伤时,正电子在其中的寿命随之发生改变。

在很多情况下,正电子可以与介质中的电子结合形成类似氢原子的束缚态,称为正电子素。根据正电子与电子结合时两者自旋的取向,可以形成两种正电子素。正、负电子自旋取向平行的称为三态正电子素(图 1-a);取向相反的称为单态正电子素(图 1-b)。三态正电子素寿命为 1.4×10^{-7} 秒,而单态正电子素只有 1.2×10^{-10} 秒。在形成正电子素时,三态正电子素占 75%,单态正电子素只占 25%。然而,由于三态正电子素体系的能量略高于单态体系,它具有向单态转变的趋势。譬如,若正电子发生湮灭的物质中有不成对的电子或自由基存在,就会促使三态正电子素转变为单态正电子素。伴随这种转变可观察到正电子湮灭寿命的变化。

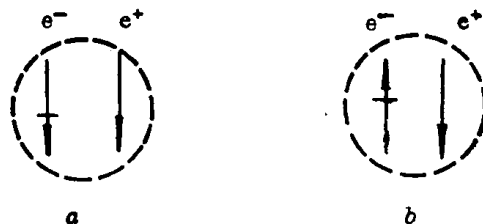


图 1. 单态正电子素与三态正电子素中 e^+ 和 e^- 的自旋取向

在各种物质中正电子能否形成正电子素,以及形成正电子素之后,三态向单态的转变均与物质的化学结构和状态密切相关。这是利用正电子湮灭技术研究化学问题的依据之一。

2. 湮灭 γ 射线的角度分布反映发生湮灭的电子动量分布

如果发生湮灭的正、负电子都是静止的,根据动量守恒原理,湮灭辐射的两条 γ 射线之间的夹角应为精确的 180° 。通常发生湮灭时,正电子已慢化到接近热运动,动量可忽略。但介质中的电子具有一定的动量,致使两条 γ 射线之间的夹角与 180° 略有偏离。偏离的角度 θ (图 2)与电子动量之间的关系为:

$$\sin \theta = \frac{P_z}{m_0 c}$$

式中 P_z 是垂直于 γ 发射方向上的电子动量, m_0 是电子质量, c 是光速。

当 θ 很小时得:

$$\theta \approx \frac{P_z}{m_0 c}$$

因此,湮灭放出的两条 γ 射线在 180° 附近的角分布就反映出湮灭电子的动量分布。由于介质结构的变化会同时产生电子动量分布的改变,所以测量正电子湮灭的角分布即成为研究物质微观结构的一种手段。

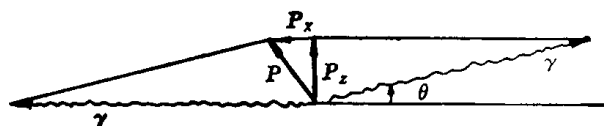


图 2. 在 2γ 湮灭中,电子在 Z 方向的动量 P_z 与偏角 θ 之间的关系

3. 湮灭电子的动量引起湮灭辐射能量的改变——能量的多普勒加宽

在实验室系，由于湮灭的正、负电子对相对于探测器运动而产生多普勒位移，致使放出的 γ 射线能量与 511keV 有所偏离。使得 Ge(Li) 探测器测到的湮灭峰变宽，称为多普勒加宽。

由于湮灭时正电子的运动可以忽略，所以，电子动量与辐射能量的位移 ΔE 之间的关系为：

$$\Delta E = \frac{cP_x}{2}$$

式中 P_x 是在辐射发射方向上的电子动量， c 是光速。当湮灭的电子具有 4eV 能量时，引起 γ 射线能量的位移最大为 1keV。

用高分辨率的 Ge(Li) 探测器测量湮灭峰的加宽，也能提供有关湮灭电子动量分布和材料结构特征的知识。

二、实验技术

1. 正电子湮灭寿命测量

(1) 正电子源 适于做为正电子源的放射性同位素有多种，如 ^{22}Na ， ^{64}Cu ， ^{58}Co ， $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ ， ^{48}V ， ^{65}Zn ， $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ 。由于 ^{22}Na 在发射 e^+ 的同时还放出一条 1280keV 的 γ 射线，可以做为 e^+ 产生的时标，所以在寿命测量中主要使用 ^{22}Na 做正电子源。

用快—慢符合的方法测量 1280keV γ 射线与湮灭发出的 511keV γ 射线之间的时间间隔，可表征正电子的湮灭寿命。测量寿命一般使用的源强为 $5\sim 10\mu\text{Ci}$ 。将无载体 ^{22}Na 溶液滴在云母或 Mylar 薄膜上，烘干后用另一片薄膜盖上封好即可使用。测量时将放射源夹在两块待测样品之间。

(2) 正电子寿命谱仪 装置示意图见图 3。探测器由快塑料闪烁体和光电倍增管匹配组成。调节慢道分析器的能窗，使探测器 A 和 B 分别记录同一个 e^+ 产生和湮灭的信号——1280 keV 和 511keV γ 射线。这两个信号之间的时间间隔经一台时幅变换器(TAC)转成为一个高度与时间间隔成正比的脉冲，输入多道分析器。多道分析器的门是由慢道符合控制的，如此即可以记录到正电子的湮灭寿命谱(图 4)。随着探测器和电子学系统的改进，正电子湮灭寿命谱仪的时间分辨率不断提高。目前最佳时间分辨率已达到 $1.5\times 10^{-10}\text{sec}$ 。

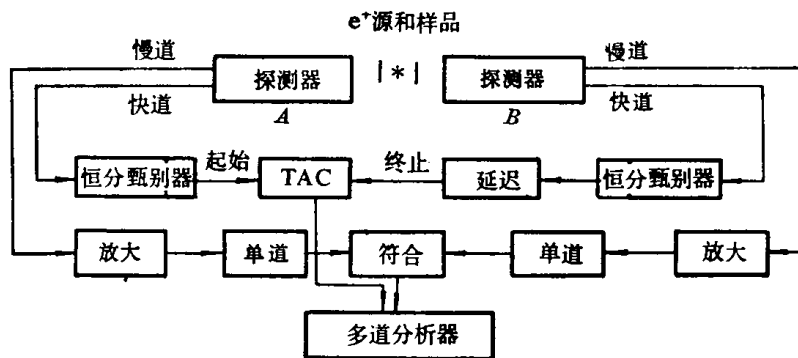


图 3. 测定 e^+ 寿命的快-慢符合装置

2. 角关联测定

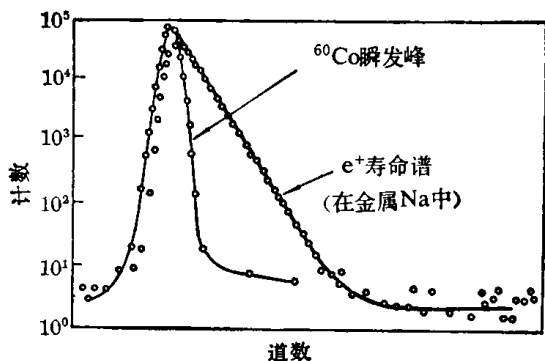


图 4. 正电子湮灭的寿命谱

测量 γ 射线角分布所使用的装置见图 5。由于偏角 θ 很小(一般为 $5\sim 10$ 毫弧度级)，为了提高仪器的分辨率，必须将探测器放在距源数米远且在前方用窄缝限制立体角。故此，必须使用数十毫居里甚至数居里的强源：目前典型的分辨率小于 1 毫弧。探测器使用 NaI 晶体，放射源和样品两侧的探测器用符合电路联接，其中一侧的探测器固定不动，而另一侧为活动可移。以其所在的角度 θ 为横坐标，符合计数为纵坐标作图，即得角关联曲线(图 6)。

在金属中正电子与传导电子湮灭产生的角分布曲线是倒抛物线形的。根据这部分曲线可以测定费米电子动量——费密能。如果最大的偏角为 $\theta_{\max}$ (一般 4 毫弧)，相应的费米能 E_F 是：

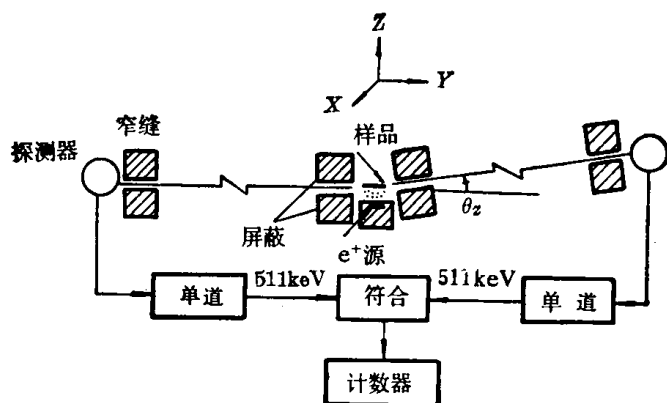


图 5. 测量 2γ 湮灭角关联的装置

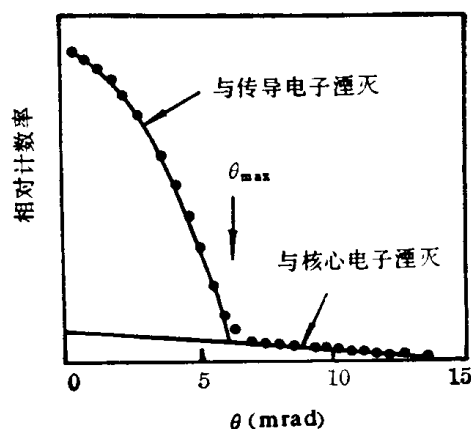


图 6. 典型的角关联曲线

$$E_F = \theta_{\max}^2 m_0 c^2 / 2$$

式中 θ 的单位是弧, $m_0 c^2$ 是电子的静止质量。正电子与金属的核心电子湮灭产生的角分布曲线是高斯形的。正电子在金属中湮灭的角分布曲线一般是这两部分的迭加(见图 6)。利用去卷积(*deconvolution*)的处理方法可以将这两部分分开。以了解在正电子湮灭中这两类电子所占的比重。

上面介绍的角关联装置只能测定一个方向的电子动量分布, 称为一维角关联。这种装置探测效率很低。为了获得一条角分布曲线, 要测许多点, 而每一点都要测量很长时间才能累积足够的计数。测一条角分布曲线往往需要数昼夜。75 年以后发展了二维角关联技术, 利用多个探测器同时测量 Y 和 Z 两个方向的动量分布, 大大缩短了测量时间。77 年 Berko 完成了距离样品 10 米处每侧安放 32 块 NaI 晶体的二维角关联装置, 分辨率达到 0.5×1.5 毫弧²。获得了较精细的二维角分布图。随后利用多丝正比室和火花室做二维角关联的探测器, 进一步提高了分辨率, 使在每个探测方向达到 0.1 毫弧。这是一个值得重视的发展方向。由于它提高了分辨率, 大大节省了测量时间、能同时给出精细的二维信息。所以, 对于研究电子动量分布的工作是一个很有潜力的技术。

3. 多普勒加宽技术

用 Ge(Li) 探测器测量湮灭峰的多普勒加宽, 也可获得类似角关联测量给出的信息。但是测量精度比角关联低数倍至一个量级 ($1.0 \sim 1.5 \text{ keV}$ 相当于 $4 \sim 6$ 毫弧)。该技术的优点是计数容易累积, 使用的放射源也弱得多, 几十分钟即可测得一个多普勒加宽谱, 从而在一定程度上弥补了分辨率低的不足, 使之成为一种方便的测试手段。同时测量二维角关联和多普勒加宽, 可给出三个方向上电子的动量成份。

利用多普勒加宽技术研究材料的结构特征时, 常使用以下几种表征湮灭峰形状的参数, 称为线型参数。

H 参数: $H = A / \text{SUM}$

A 是 γ 能峰中心部分的面积, SUM 是 γ 能峰的总面积(图 7), H 参数表征在湮灭中传导电子(低动量电子)所占的比重。一般选取中心部分的面积使 H 值接近 0.5。

w 参数: $w = (B + C) / \text{SUM}$

B 和 C 是 γ 能峰两翼的面积(图 7)。w 参数表征在湮灭中核心电子(高动量电子)所占的比重。

S 参数: $S = A / (B + C)$

S 参数表征在湮灭中, 传导电子与核心电子的相对比。S 的变化比 H 和 w 的变化更灵敏。当发生能够导致增加 e^+ 与传导电子湮灭的结构变化时, 如产生晶格缺陷, S 参数即增大。反之, 如果结构的改变导致 e^+ 与核心电子湮灭增加或导致电子动量降低, 则 S 值即变小。

金属中产生的空位、位错等缺陷象陷阱一样捕获正电子, 从而降低了正电子与核心电子发生湮灭的几率, 致使 S 参数增大。根据观测 S 参数的变化可以研究金属缺陷的产生和恢复。

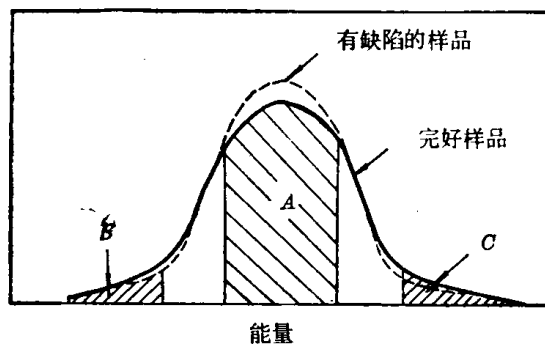


图 7. 湮灭 γ 能峰

三、正电子湮灭技术的应用

1. 在金属研究中的应用

目前在金属中正电子湮灭实验基本上可分为两大类,一类是利用单晶试样研究传导电子的动量分布,测定费米能和费米面;另一类实验是利用正电子被缺陷捕获的性质来研究金属缺陷的产生和恢复,测定空位形成能和空位浓度以及研究塑性形变和辐射损伤等等。

(1) 费米面是描述金属中传导电子的动力学性质的一个数学结构。金属和合金的许多重要性质均与费米面有关。用其他实验方法只能测定溶质浓度低于1%的稀释合金的费米面。1965年以前,非稀释合金的费米面还是未知的。随后发展起来的正电子湮灭技术为测量非稀释合金的费米面提供了有力的手段。用经典方法研究费米面,要求低温、大磁场、高纯度的单晶等;而用正电子湮灭方法则不受这些限制,因此甚为优越。

(2) 利用正电子湮灭技术研究金属缺陷 ①测定空位浓度:在金属晶体缺陷处,缺少了原子使局部电子密度降低,减少了 e^+ 和离子实之间的排斥,产生一个负的电势。因此,晶体中的空位、空穴和位错就成为吸引正电子的陷阱,将正电子捕获在其中。根据自由正电子被缺陷捕获的比可以推导出缺陷的浓度 C_N :

$$C_N = \lambda_f(F - F_f) / \mu(F_N - F)$$

式中 λ_f 是自由态正电子的湮灭速率, μ 是缺陷对正电子的捕获速度, F 是正电子湮灭的特征参数,可以是寿命 τ 、线性参数 S 或角关联的符合计数 $N(0)$ 。其中 F_f 代表全部正电子均在自由态下湮灭时的湮灭参数, F_N 代表正电子均被缺陷捕获时的湮灭参数, F 为在给定条件下测得的参数, λ_f , F_N , F_f 和 F 均由实验测得。②测定空位形成能:在热平衡下晶格空位的浓度 C_v 与空位形成能 E_f^v 之间有如下关系:

$$C_v = A \exp(-E_f^v/kT)$$

式中 A 是常数, k 是波耳兹曼常数, T 是绝对温度。

测量不同温度下正电子湮灭的参数,求得空位浓度 C_v ,再根据上式即可计算出空位形成能。

(3) 研究金属和合金的塑性形变、位错和疲劳损伤 实验发现,塑性形变使正电子湮灭的角关联曲线变窄,辐射 γ 能峰也变窄,由于在位错核心附近的晶体密度较低,正电子在此湮灭的寿命变长。

在纯Cu和Al合金中,捕获百分数 P_t 与形变量的对数值之间有直线关系:

$$P_t = A + B \log D$$

D 是以厚度减少百分数表示的形变量, A 和 B 是与样品特性有关的参数。

塑性形变产生位错和空位等缺陷。位错是工艺上最重要的缺陷,但是,与空位型缺陷相比,实验上和理论上对位错的研究都困难得多。用正电子湮灭技术研究形变的无氧铜,测定在不同形变量时湮灭的寿命 τ 和 S 参数,由此计算出每个形变量对应的位错总捕获速率 K ,根据 $K = \mu d \cdot Cd$ 即可求出每种形变量对应的位错体密度 Cd 。 μd 是单个位错对正电子的捕获速率。

根据正电子在疲劳形变铁中湮灭的角关联曲线的变化和寿命的改变,表明正电子湮灭技术可以做为测试材料疲劳损伤的无损检验方法。

(4) 研究金属相变 多数相变的动力学是受原子扩散过程控制的,因此,空位的存在对相变有直接的影响。还发现合金在有序和无序态下扩散激活能有差别。这都是利用正电子湮灭研究相变的依据。目前正电子湮灭技术已经较成功地应用于研究有序-无序转变、马丁转变、沉淀析出、固化、熔熔、再结晶过程以及合金反向转变的滞后行为等。

(5) 研究金属的辐射损伤 目前电镜只能观测大于 $12\text{\AA}$ 的空洞,再小的缺陷即观察不到了。而且,用电镜方法要破坏试样,因此,不能观测单空位、双空位的产生,也不能对空洞成核和生长进行跟踪测量。而且正电子湮灭技术检测空位和空洞,既灵敏又可跟踪。所以它已成为研究金属辐照损伤的很有力的工具。例如,根据测定用快中子辐照的Mo中正电子的湮灭寿命,得知被辐照的Mo单晶中产生了大量的双空位型缺陷。

在金属研究中的应用是正电子湮灭技术最富有成效的一个应用领域,也是开展工作最集中的领域。在1979年第五届国际正电子湮灭会议上宣读的论文中几乎一半与金属有关。

2. 在离子结晶研究中的应用

正电子对离子结晶中的晶格缺陷也是灵敏的。1968年根据测定正电子在碱金属卤化物中的湮灭寿命,已证明离子晶体中的缺陷也能捕获 e^+ 。随后开展了大量工作,研究在离子结晶中 e^+ 与晶格缺陷之间的作用。为利用此方法研究离子结晶提供了依据。

目前正电子湮灭方法在离子结晶研究中的应用主要涉及到热缺陷的产生、晶体淬火、晶体着色、 F 心的聚集、二价杂质掺杂、辐射损伤、晶体的塑性形变以及混晶等。

3. 在分子材料研究中的应用

正电子在分子材料和聚合物中可以形成正电子素。湮灭寿命谱往往很复杂。确切地分解寿命谱和对各个湮灭成分做出解释均有一定的困难。然而，由于正电子素能够定域在分子晶体的缺陷中，因此，有可能借助于正电子素被捕获来探测分子晶体中的晶格缺陷，就象用被俘获的正电子探测金属缺陷一样。

最近引起兴趣的一个课题是用正电子湮灭研究玻璃，如玻璃转变、双元玻璃的结构和玻璃的晶化等问题。最有前景的应用是研究与相分离和晶化过程有关的动力学现象。

4. 正电子素化学

正电子素是类氢原子，在化学性质上相当于氢的同位素。三态正电子素具有长的湮灭寿命($1.4 \times 10^{-7} \text{sec}$)，能够参加化学反应。测量正电子湮灭寿命可以获得有绝对时间尺度的化学反应速度常数 K 。

利用正电子做探针研究化学问题以及研究正电子素的形成和它的化学反应是“正电子和正电子素化学”的主要研究内容。

5. 在生物医学中的应用

利用衰变放出 e^+ 的放射性同位素 ^{11}C ， ^{13}N ， ^{15}O ， ^{18}F 等合成有生理兴趣的标记化合物，如 ^{11}CO ， $^{11}\text{CO}_2$ ， H_2^{15}O 等，吸入或注入人体，它们的半衰期短，可大大降低对人体的辐照。根据聚集在某脏器中的正电子湮灭发出的 γ 射线进行测量或照像，可以定量地研究生理过程、血液循环和在心脏、大脑中的血液体积。正电子照像还可用于肿瘤的诊断和定位，对人体不造成创伤，成为医学研究中一种很有前途的技术。

四、正电子湮灭技术的优缺点

1. 优点

(1) 非破坏测试，一般对样品制备无特殊要求。

(2) 利用正电子湮灭技术可以研究动力学现象。正电子源不受化学状态和外界环境的影响，高温、高压、磁场均不影响正电子的发射，探测的信号是穿透力很强的 γ 射线。所以，可以在升温、降温和压力改变的条件下进行测量来做动态研究。

(3) 可研究的样品范围广泛。金属、绝缘材料、半导体、有机液晶、生物材料、气体、液体等均可使用。

(4) 用正电子湮灭技术研究晶体缺陷具有以下三个优点：只对原子尺度的微观缺陷敏感，这对研究功能材料颇为有用；正电子只对空位型缺陷敏感，对间隙型缺陷不敏感，所以便于鉴别缺陷的类型；灵敏度高。用正电子湮灭技术可探测缺陷浓度的范围为 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 。

2. 缺点

(1) 在较复杂的环境中，对正电子湮灭行为了解得尚不清楚，因此，对实验结果的解释带有任意性。往往需要配合其它一些测试手段才能获得有价值的结论。

(2) 正电子对材料的结构特征十分敏感，所以必须对测试样品的加工和处理过程有足够的了解。

五、正电子湮灭技术的展望

1933年安德逊发现了正电子。随后的三十年对正电子湮灭现象做了研究。直至60年代后期了解到正电子可被晶格缺陷捕获，并由Brandt于1967年提出“捕获模型”之后，正电子湮灭即被迅速的用于金属和固体物理研究中，成为研究材料微观结构的一个新技术。

最近十年来，这个课题的研究获得很大发展。至今已召开过五次国际会议。79年召开的第五届国际正电子湮灭会议有170余人出席，而1982年将召开的第六届国际会议参加人数预计将达到900余人。这标志着正电子湮灭技术正在迅速地引起广泛的注意。

The positron annihilation technique

Wang Yunyu

(Institute of High Physics, Academia Sinica)

Abstract

The positron annihilation technique is explained. Principles of the positron lifetime measurement, γ - γ angular correlation and energy measurement of γ -ray are described.

The positron annihilates with an electron from the surrounding medium dominantly into two 511 keV γ quanta, emitted practically collinearly in opposite directions. This process is very sensitive to the states of surrounding electrons, specially to crystal imperfections in metals. This makes the positron annihilation technique (PAT) of a new nondestructive method in the studies of matter.

During the last ten years PAT has proved to be a valuable, useful and often unique probe for the study of physics and chemistry of solids, liquids and gases.

The most successful fields using the PAT are the researchs of electronic structures of matter, crystal lattice defects. But some new fields of application, such as nondestructive testing of materials and medical applications—positron cameras, locating cancer in a human body, have been attracting attentions.

同步辐射研究和同步光源

何 多 慧

(中国科学技术大学)

同步加速器辐射简称同步辐射。它是高相对论性电子在磁场中作曲线运动时沿轨道切线方向发出的一种电磁辐射,或称作光,因首先在电子同步加速器上被直接看到而得名。

同步辐射限制电子同步加速器的最高能量,这对高能物理机器是一个致命障碍。这一事实曾经影响了高能物理的进程,导致斯坦福两英里直线加速器的建立。但在这同时,人们发现同步辐射有许多优异特性,是一个理想的光源。于是所有高能物理用的电子同步加速器和电子储存环都被改造,同时进行同步辐射研究。现在同步辐射已广泛应用于固体物理、原子物理、分子物理、表面物理、生物学、化学、材料科学、超大规模集成电路的光刻、光学标准计量等许多科学技术领域,取得了大量重要成果。

同步辐射的特性

同步辐射有许多优异的特性。某些特性与同步光源的种类有关。实际使用的同步光源有电子储存环和电子同步加速器两种,而前者比后者优越,因为它能量稳定,束流强度高而稳定,束团尺寸、位置稳定,真空度高。专用光源都采用储存环,所以我们将针对储存环来讨论同步辐射的特性。

在同步光源中,电子每圈辐射损失远远小于电子本身能量,因此我们采用经典电动力学方法来研究辐射特性,量子力学修正可以忽略不计。

同步光源的电子密度不太大,各个电子的辐射互相独立,可以采用单电子模型处理。

1. 天然准直性

辐射功率的角分布表征辐射的准直程度。

向心加速的非相对论性电子 $\beta \ll 1$, 辐射功率角分布为^[1]:

$$\frac{dp}{d\Omega} = \frac{e}{4\pi c^3} |\dot{\vec{v}}|^2 \sin^2 \alpha \quad (1)$$

这里 α 为加速度 $\dot{\vec{v}}$ 与观察方向之间的夹角, e 为电子电荷, c 为光速, $\dot{\vec{v}}$ 为速度矢量。

向心加速的相对论性电子在实验室系中辐射功率角分布为^[1]:

$$\frac{dp}{d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi c^3} \frac{|\dot{\vec{v}}|^2}{(1-\beta \cos \theta)^3} \left[1 - \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{\gamma^2 (1-\beta \cos \theta)^2} \right] \quad (2)$$

这里 $\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$ 为电子能量与静止能量之比。 θ 为观察方向与 $\dot{\vec{v}}$ 夹角, 即纬度; ϕ 为经度。

高相对论性电子 $\gamma \gg 1$, 由(2)式得同步辐射功率角分布为:

$$\frac{dp}{d\Omega} = \frac{2}{\pi} \frac{e^2}{c^3} \gamma^6 \frac{|\dot{\vec{v}}|^2}{(1+\gamma^2 \theta^2)^3} \left[1 - \frac{4\gamma^2 \theta^2 \cos^2 \phi}{(1+\gamma^2 \theta^2)^2} \right] \quad (3)$$

可见同步辐射的瞬时功率集中在运动方向上极小的光锥内。我们用均方根角表示光锥的半张角,

$$\bar{\theta} = (\theta^2)^{1/2} = \left[\frac{\oint \theta^2 \left(\frac{dp}{d\Omega} \right) d\Omega}{\oint \left(\frac{dp}{d\Omega} \right) d\Omega} \right]^{1/2} \approx \frac{1}{\gamma} \quad (4)$$

对 GeV 量级的电子, $\bar{\theta}$ 约零点几毫弧度。

在储存环中,辐射阻尼与量子涨落平衡决定电子有一定的发射度,即有一定的散角。实际光锥的半张角为电子散角 σ'_b 与 $\bar{\theta}$ 的叠加,即 $\sigma' = \sqrt{\bar{\theta}^2 + (\sigma'_b)^2}$ 。在 GeV 量级的储存环中, σ' 一般仍为零点几毫弧度。可见同步辐射具有高度的天然准直性。

2. 宽广范围内的连续谱

同步辐射谱范围极宽,而且连续。使用转动单色器可以得到波长连续改变的单色光。这一性质称为同步辐射的可调性。

由匀速圆周运动电子的辐射可以定性地了解同步辐射频谱的宽度。

从图1和(4)式可知,在C点的观察者所看到的是一个周期性光脉冲,我们近似视为矩形脉冲。脉宽 τ 为电子通过 $\widehat{AB}$ 弧所用时间与光通过 $\overline{AB}$ 弦所用时间之差, $\tau \approx \frac{R}{c\gamma^3}$ 。脉冲周期 $T_0 \approx \frac{2\pi R}{c}$ 。对这周期函数作傅里叶级数展开,其频率从 $\frac{c}{R}$ 到 $\gamma^3\left(\frac{c}{R}\right)$ 。例如:1GeV能量的电子,曲率半径 $R=2.77$ m,辐射的频率范围从高频直至软X射线,但是离散谱线。

在电子储存环和电子同步加速器中,由于纵向和横向振荡,电子不是严格的匀速圆周运动,辐射不再是离散谱线,而是连续的同步辐射谱。Schwinger采用傅里叶积分的方法得到了同步辐射功率的波长和角分布为^{[2][3]}:

$$\frac{dp}{d\lambda d\psi} = \frac{27}{32\pi^3} \frac{e^2 c}{R^3} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^4 \gamma^6 [1 + (\gamma\psi)^2]^2 \left[K_{2/3}^2(\xi) + \frac{(\gamma\psi)^2}{1 + (\gamma\psi)^2} K_{2/3}(\xi) \right] \quad (5)$$

这里 $\xi = \frac{\lambda_c}{2\lambda} [1 + (\gamma\psi)^2]^{3/2}$, ψ 是对轨道平面的仰角。 $K_{1/3}$, $K_{2/3}$ 是第二类变型贝塞尔函数。

$\lambda_c = \frac{42R}{3\gamma^3}$ 称为临界波长。由 $K_{1/3}$, $K_{2/3}$ 的性质和 ξ 的定义可知,当 $\lambda < \lambda_c$ 时,随着 λ 的减小,辐射功率迅速下降为零。即 λ_c 接近同步辐射谱的截止波长。

(5)式对 λ 积分可得辐射功率按仰角的分布。(5)式对 ψ 积分得同步辐射谱为:

$$\frac{dp}{d\lambda} = \frac{3^{5/2}}{16\pi^2} \frac{e^2 c}{R^3} \gamma^7 \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^5 \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta \quad (6)$$

这是单个电子在一个几何点上单位波长内辐射的瞬时功率。而实际上发光的不是单个电子,而是一定的束流强度;光学元件接收到的光也不是来自一个几何点,而是来自一定的轨道长度,视窗口宽度而定;一个单色器的分辨能力 $\lambda/\Delta\lambda$ 是一定的,只能分辨出一定带宽 $\Delta\lambda/\lambda$ 的光,而不是按单位波长分光。因此,我们采用每毫安流强、每毫弧度轨道、每百分之一带宽内辐射的功率来表示同步辐射谱。(6)式变为:

$$p_{1\%}(\lambda) = 5.95 \times 10^{-10} \frac{\gamma^4}{R} G_2\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \text{W} / \left(\text{mA} \cdot \text{mrad} \cdot 1\% \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) \quad (7)$$

这里 $G_2\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2 \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta$,

R 的单位为米, $G_2\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)$ 如图2所示。功率谱峰值在 $0.76\lambda_c$ 处。 G_2 仅与 $\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)$ 有关,与具体机器无关,是一普适函数。具体机器参数仅改变功率的大小,不改变分布形式。

在大多数实验中使用光子通量比功率方便。 $p_{1\%}(\lambda)$ 除以光子能量 $h\nu$ 得光子通量:

$$N_{1\%}(\lambda) = \gamma F\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \text{光子} / \left(\text{sec} \cdot \text{mA} \cdot \text{mrad} \cdot 1\% \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) \quad (8)$$

这里 $F\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) = 1.26 \times 10^8 \frac{\lambda_c}{\lambda} \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta$

F 亦为普适函数,如图3所示。由这普适曲线很容易得到具体机器的光子通量曲线。

(7)、(8)两式表示同步辐射谱是连续谱,并与实验测量结果精确地符合。如果我们假定光子通量不低于峰值的十分之一的波长范围为可用范围,则同步辐射谱可用范围为 $0.2\lambda_c \sim 10^4\lambda_c$ 。

如电子能量 $E=2.5\text{GeV}$,磁感应强度 $B=12\text{kG}$, $\lambda_c=2.5\text{\AA}$,则可用范围为 $0.5\text{\AA} \sim 25000\text{\AA}$ 。所以同步辐射谱是宽广范围内的连续谱。

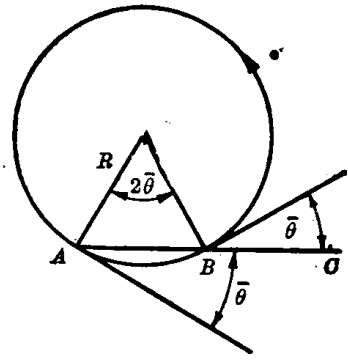


图1. 计算同步辐射光脉冲宽度图

* 图中e应为 e^-

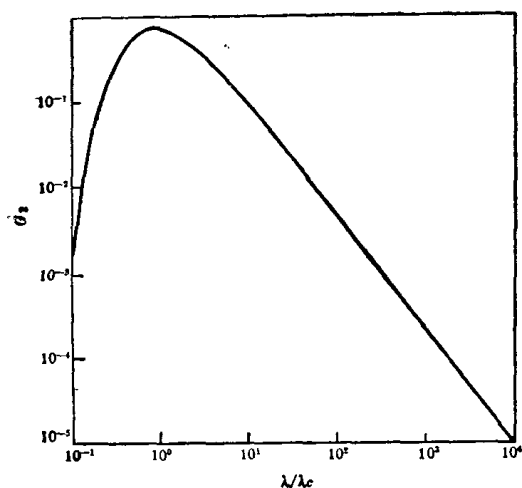


图 2. $G_2\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)$ 曲线

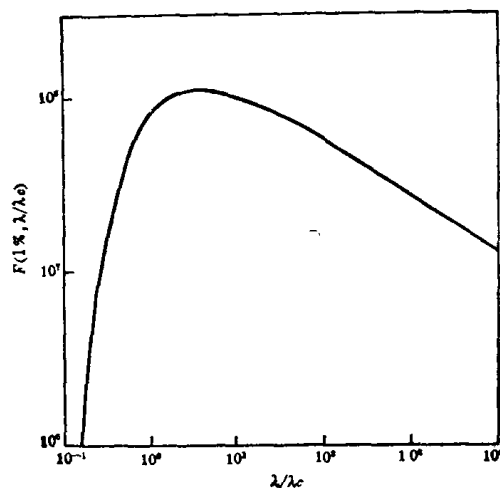


图 3. $F\left(\frac{\lambda_c}{X}\right)$ 曲线

3. 高强度

同步辐射的强度远远高于普通光源。积分(2)式得到每个电子辐射功率为:

$$p = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{R^2} \beta^4 \gamma^4 \quad (9)$$

则每个电子每圈辐射损失为:

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{e^2}{R} \beta^5 \gamma^4 \quad (10)$$

一定流强的电子束流辐射总功率为:

$$p = 88.47 E^4 I / R \text{ kW} \quad (11)$$

或以磁感应强度表示:

$$p = 2.654 B E^3 I \text{ kW} \quad (12)$$

式中单位: I ——A, E ——GeV, B ——kGs, R ——m.

若 $E=2.5\text{GeV}$, $B=12\text{kGs}$, $I=0.5\text{A}$, 辐射功率为 250kW 。而最强的 X 射线转靶使用 50kW 功率的电子束流也仅能得到约 10W 功率的 X 射线, 而且还几乎全部集中在阳极的特征线上, 连续的韧致辐射功率是很小的。可见作为连续的 X 射线光源, 同步辐射的强度远远超过普通 X 光管。

由于高强度、天然准直性、小的光源截面(一般约 $0.01 \sim 1\text{mm}^2$), 再加上连续谱的特性, 同步辐射的亮度(单位光源截面、单位立体角、每秒内辐射的光子数)远远高于许多普通光源。它在 X 射线波段比 X 光管阳极特征辐射强 10^4 倍, 比连续韧致辐射强 10^7 倍。特别在真空紫外光波段, 几乎没有普通光源可用, 同步辐射更是独占鳌头。

4. 偏振性

同步辐射是偏振光。事实上, (5)式的第一项相应于平行于轨道平面的平行偏振分量, 第二项相应于垂直偏振分量。由于同步辐射的准直性, 垂直分量很小。在总辐射功率中平行偏振光占 $7/8^{[1,4]}$ 。图(4)表示平行和垂直偏振分量的角分布。显然可以用光阑来提高所用光的平行偏振成分。

同步辐射的天然准直性是优越的, 因为普通光要起偏振, 必须依靠在介质表面的反射、折射和双折射, 不仅增加设备而且要降低强度。

5. 脉冲时间结构

在电子储存环和电子同步加速器中, 由于自动稳相过程, 电子束流沿轨道分成若干分离的束团。团的长度由机器参数决定, 改变机器参数可以改变团长。团的数目等于谐波数 h , 即高频频率与电子回旋频率的比值。控制注入过程可使机器具有不同的束团数(从 1 到 h 团), 从而具有不同的束团间隔。

电子束团结构决定了同步辐射的脉冲时间结构。例如斯坦福直线加速器中心 2.5GeV 的 SPEAR 环的光脉冲宽度为 $0.2 \sim 0.4\text{ns}$, 脉冲间隔为 $2.8 \sim 780\text{ns}$ 。

6. 干净的光源

普通光源的发光都与原子分子过程有关。而同步辐射的发光机理完全不同,是自由电子发光,发光体不产生杂质。而且储存环工作在 10^{-9} mmHg 以上的超高真空状态,所以不会污染样品,对表面物理研究特别有利。

7. 稳定性

储存环的能量、流强、束团尺寸和位置都很稳定,所以是稳定的光源。尤其是满能量注入的储存环,由于可以不断补充损失的束流,光通量长期稳定。

同步辐射的应用

光,无论是可见光或不可见光,每一种新光源的出现就会开辟一些新的科学领域,就有许多新发现。同步辐射也不例外。下面是其典型应用。

1. 延展的X射线吸收边精细结构(EXAFS)分析

EXAFS 是一种重要的结构分析方法,它可以确定复杂的多原子材料中每种原子的配位环境,是同步辐射在X射线波段内应用的最主要结果之一。我们用一个具体例子来说明 EXAFS 分析方法。图 5 为 CuAsSe_2 的相对吸收系数与 X 射线能量的关系曲线^[5]。X 射线能量不高时,随能量增加吸收系数单调下降。当达 9keV 时,足以激发铜的 K 层电子到最低的空能态,吸收系数锐增,称为铜的 K 吸收边。再往上,吸收系数显示出在一个单调下降的曲线上叠加上一个精细结构。这个精细结构是由于铜原子周围其它原子对铜原子光电子的反散射造成的,分析这精细结构可以确定样品中铜原子的配位环境,即周围其它原子的种类、数量、原子间距离等。例如据此测量原子间距离可以精确到 $0.01\text{\AA}$ 。这种方法称为 EXAFS 分析。对于任何复杂的多原子材料,如果各类原子的吸收边不是非常靠近,可用这种方法确定每种原子的配位环境,从而确定材料的原子排列。这在科学和技术上有极重要的价值,因为这是从微观上了解材料的物理和化学性质的第一步。EXAFS 分析不仅可以研究晶体,更重要的是可广泛用来研究非晶体、无法结晶或结晶很差的材料。如含金属原子的蛋白质、晶体和非晶体的半导体、超导体、催化剂、表面、晶体或非晶体中的低浓度杂质等。样品可以是气体、液体、固体和薄膜。同步辐射的偏振性,还有利于各向异性材料的 EXAFS 研究。

2. X 射线衍射

半个世纪以来,X 射线衍射一直是研究凝聚态物质中原子排列的一种基本方法。同步辐射的优异特性使它如虎添翼。由于可调性,使得在衍射实验中可以利用反常散射决定衍射向量的相位;由于高强度,可以快速做 X 射线形貌,还有可能在衍射实验中进行动态研究;由于准直性,使小角度衍射实验简单,X 射线形貌分辨率高。

(1) 利用反常散射确定衍射向量相位 用 X 射线衍射进行晶体结构分析时,若能测定衍射向量的强度和相位,就可以通过傅里叶变换确定晶体样品中电子密度分布。但是,至今还没有办法直接测定相位,必须采取间接的办法。例如,在蛋白质晶体结构分析时,通常采用多次同晶型替代的办法,通过测量衍射强度的变化来测定相位。这种测定相位的办法非常麻烦,而且更重要的是

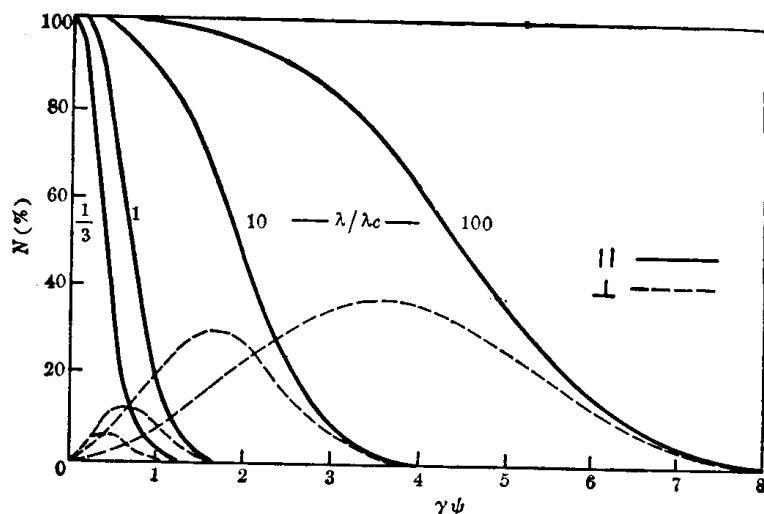


图 4. 同步辐射的平行和垂直偏振分量角分布

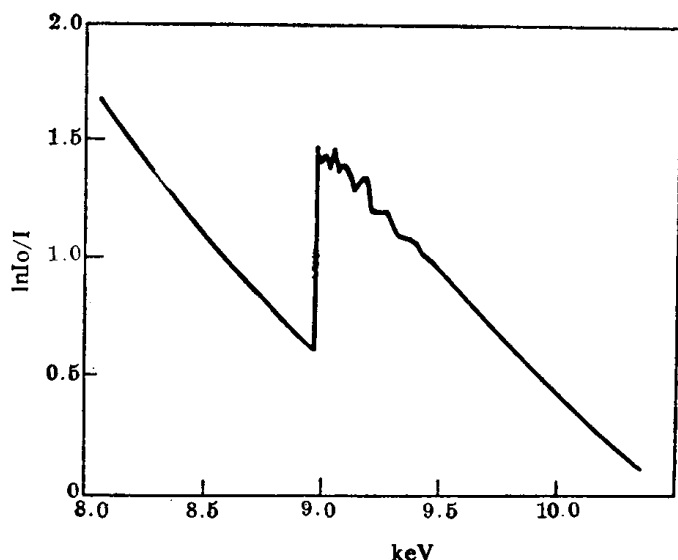


图 5. CuAsSe_2 的相对吸收系数与 X 射线能量的关系

很多晶体无法得到一系列同晶型派生物,因而使X射线衍射晶体结构分析受到很大限制。

X射线反常散射提供了另一种确定衍射向量相位的方法。任何原子的吸收边处,散射发生突变,引起衍射强度改变。在晶体的某类原子吸收边两侧各进行一次衍射实验,就相当于对这类原子进行了一次同晶型替代。这使X射线衍射结构分析变得简单,也扩大了研究范围。

同步辐射的可调性,可使反常散射达到最佳情况。高强度则使衍射光至少比X光管强60倍,因此仅需几分钟的曝光时间。在这样短的时间内,蛋白质晶体的衍射能 p 几乎不变。又因为同步辐射亮度高,可以用小到 50μ 直径的晶体进行衍射实验,这使蛋白质结构研究范围大大扩大。正在新建的专用同步光源强度更高,还可做动态研究。

此外,X射线衍射,还可用于研究二元合金有序-无序的临界现象、帮助决定非晶体材料中的原子排列以及结合小角度衍射研究多相物质。

(2) 小角度衍射 X射线小角度衍射主要用来研究大分子的尺寸和形状,研究组织。如几十到几百埃的肌肉和网膜,纤维和多层体系,溶解的大分子,多孔催化剂,多元合金中的相位分离或同临界现象有关的密度起伏等。

在小角度衍射实验中,由于同步辐射的准直性,使衍射光和透射光自然分开。(若用X光管,不仅需要复杂的准直系统,而且强度进一步降低)。由于其高强度,可以在几微秒内得到一个衍射图案,故可做动态研究,如研究肌肉的收缩过程。又由于其可调性,在研究由电子密度相同但化学成份不同的各相组成的多相体系时,可调节X射线波长使一相中某一元素发生反常散射,从而提高电子密度的有效对比度。

(3) X射线形貌学 X射线形貌学是检查晶体缺陷、裂纹、空洞、位错等的方法。晶体的完善部分和变形部分布拉格反射能力不同,测量反射强度随反射面位置的变化,即得反射面的象,从而可检查晶体。

同步辐射强度高,曝光时间可比X光管低二至四个数量级,可以快速做形貌测量,还有可能做动态研究。同步光源源点小,散角小,形貌测量空间分辨率高。

3. X射线荧光-微量元素分析

用X射线激发微量元素原子的内层电子,造成空能级,当较外层电子跃迁至这空能级时,发出特征X射线荧光。测量荧光即可定量分析微量元素含量。

光子激发的优点是散射截面小、吸收截面大。利用同步辐射的可调性把X射线能量调到微量元素吸收边,吸收截面锐增。又由于同步辐射的高强度,便可得到很强的特征荧光。此外,同步辐射是偏振光,在其电场方向瑞利弹性散射和康普顿非弹性散射有极小值,而荧光却是各向同性的,所以在这方向探测荧光信噪比很高。由于这些优点,同步辐射可以分析极低含量的微量元素。灵敏度可比质子激发X射线荧光分析高三个数量级。已有人分析出石油、粉末矿物、盐溶液中 10^{-8}g/g 浓度的微量元素。

4. 软X射线光刻和显微术

软X射线光刻技术可以用来制造超大规模集成电路,为电子工业高度微型化开辟了广阔的前景。这种光刻技术的方法与普通光刻相同。使用波长为 $10\text{\AA}\sim 20\text{\AA}$ 。在这个波段内没有别的光源能与同步辐射相比。同步辐射光刻的优点是:第一,波长短,绕射效应小,线宽可达 0.1μ ,而普通的光刻最小线宽只能达到 1μ 。所以同步辐射光刻集成度可提高至少一百倍,甚至一万倍;第二,对灰尘不敏感;第三,强度高,曝光时间短,约一秒钟。这些优点可使集成电路更微型化,成品率更高,产量更高。它可能引起电子工业一场革命性的变化,各先进工业国家正在竞相研究。

软X射线显微术与光刻类似,使用波段相同,只是模子换成了样品。感光胶显影后复以金属膜,然后在扫描电镜下检查。与电子显微术相比,它的优点是:可以显示样品内部结构;样品不必在真空中,故可以研究湿样品甚至活的生物样品。

5. 真空紫外光的应用

真空紫外光的基本应用是探测电子态,而了解电子态是了解大量更明显更重要的现象的基础。如通过电子态的研究了解固体的发光特性,纯金属、合金、半导体、超导体、绝缘体在各种不同用途中的功能,表面在催化反应中的作用,生物过程中刺激在分子中的传递,大气中不同部分的化学反应等等。而在这些研究的同时,也必然得到电磁辐射与原子、分子相互作用的知识。

同步辐射的特性为研究带来很多好处。由于强度高,可以进行角分辨光电子发射实验;由于可调性和高强度的结合,可以探测电子态随深度的变化以研究表面和吸附气体,也可以研究吸收和反射随光子能量的变化;

超高真空条件使研究表面不受污染。由于这些特性,再加上在这个波段除少数线光源外几乎没有常规光源可用,所以在这个波段内,同步辐射研究非常活跃。

6. 时间分辨谱

同步辐射的脉冲时间结构很适合于做各种时间分辨谱研究。如有机和无机分子的激发、发射,激发态的衰减等的时间分辨。有人已测得并四苯的荧光寿命短到 0.2ns。

7. 光学标准计量

迄今为止的光学标准计量工作主要是从红外线到接近真空紫外光的波段内。由于等离子体物理、天体物理、固体物理和技术、光化学、生物学和医药学的发展,对真空紫外光和 X射线的标准计量需求迅速增长。同步辐射是这些波段内最好的标准光源,因为其辐射谱可由 *Schwinger* 公式准确计算,而且储存环的流强、磁感应强度、弯转半径都可以准确测量,束流也稳定。

8. 某些未来的应用

同步辐射还可有多种用途。如分离同位素、辐射化学研究、激发 X 射线激光、诊断肿瘤等。

同步辐射的应用范围之宽是罕见的,这促进了各个学科之间的渗透,促进了不同学科的科学家之间的互相交往,促进了科学的发展。如德国电子同步加速器中心是一个高能物理基地,可是它的百分之八十的研究成果却来自寄生的同步辐射研究。现在,在世界范围内一批专用同步光源正在建立,它们将大大提高实验能力。同步辐射研究正在向着深度和广度两个方面发展,可以预料它必将取得更大的成就。

同 步 光 源

功欲善其事,必先利其器。同步辐射研究的发展和同步光源的进步密切联系在一起。

从 1947 年在电子同步加速器上看到同步辐射起直到五十年代末,在许多电子同步加速器上深入研究了同步辐射的特性。六十年代末,七十年代初一批作为对撞机的电子储存环投入运行。由于它的优越性,很快全被改造兼做同步辐射研究。整个这一时期是同步光源的第一阶段,即寄生运行阶段。它为同步辐射研究奠定了基础。

随着同步辐射研究的迅速发展,原有机器在数量和质量上很快便不能满足用户的需要。1976年以来,各先进工业国家纷纷开始建立专用同步光源,于是同步光源便进入了它的第二个阶段。

从 1978 年开始,在中国科技大学开始了筹建我国的同步光源的工作^[6]。该光源将包括两个储存环:一个 2.5GeV 储存环,用以产生硬 X射线;一个 800MeV 储存环,用以产生真空紫外光和软 X 射线。具体指标见表 1。

表 1. 中国科技大学计划建造的储存环的主要指标

机 器 名 称	电子能量 (GeV)	束流强度 (mA)	弯转半径 (m)	光子临界能量 (keV)
HSRL	2.5	300	6.94	4.96 20.8(50kG Wiggler)
	0.8	300	2.22	0.51 2.13(50kG Wiggler)

在专用同步光源的设计中,往往采取各种措施,力求充分地发挥同步辐射的优越性提高实验能力。值得提及的有以下几点:

1. 采用双环

由于储存环的优越性,专用同步光源毫无例外都采用储存环。在一个同步辐射实验室里同时建造硬 X射线大环和真空紫外光及软 X 射线小环是非常理想的。

图 6 表明,一个 2.5GeV, 0.5A 流强大环的光通量曲线完全复盖了一个 700MeV, 1A 流强的小环的光通量曲线。似乎一个 2.5GeV 大环即可同时满足硬 X射线、软 X 射线和真空紫外光的全部需要。其实不然,这是因为在大环上做真空紫外光实验是很不利的。设大环 $\lambda_c = 2.5\text{\AA}$, 若要从大环中抽取 $\lambda > 25\text{\AA}$ 的光做实验, $\lambda/\lambda_c = 10$, 通过计算可知,可用光子数占 56%, 但只占 4% 的功率,而 96% 的功率,44% 的光子数是硬 X 射线,不仅无用而且成为有害的热负载,给光学元件带来困难的冷却问题。其次,在大环上收集同样的真空紫外光,第一光学元件要比小环上的大 2~3 倍。此外,大环的真空紫外光的偏振度比小环差。如果在同一个同步辐射实

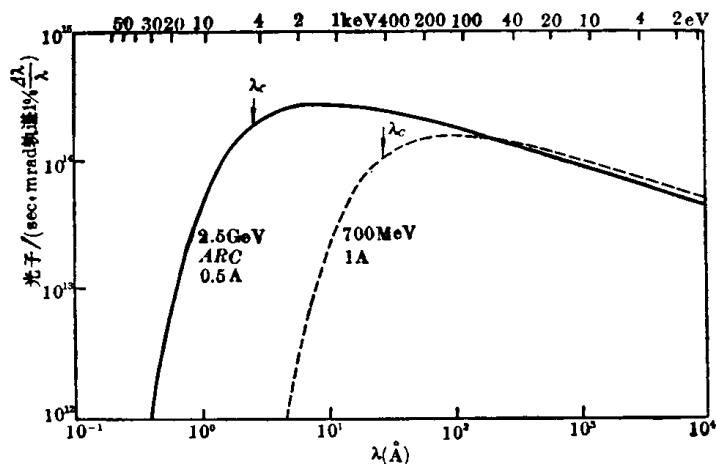


图 6. 两个储存环的光通量曲线

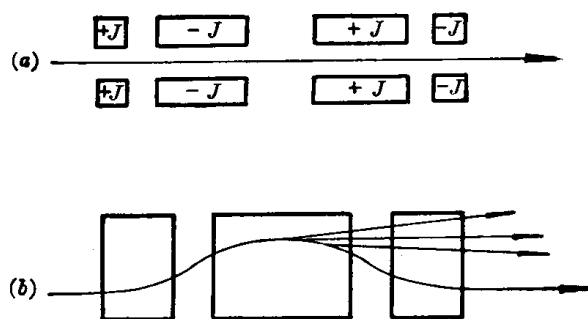


图 7. 一个波的超导 Wiggler 磁铁

a). 超导线圈电流方向(侧视)

b). 电子轨迹(顶视)

实验室建立大小两个环，不仅可解决上述问题，而且使X射线研究和真空紫外光研究各有独立的时间表，互不冲突。

2. 储存环具有多种光学性能

同一个同步光源的用户是各式各样的，他们对光源的要求各不相同。为此，使环具有多种光学性能，以尽量满足不同的要求是可取的。例如一个 800MeV 环的主要用途是软 X 射线光刻、光学标准计量、基础研究三个方面。它们对光源的要求是不同的。

(1) 光学标准计量要求源点小，即储存环束流截面尽可能地小，而流强并不重要；(2) 高分辨谱要求高亮度，即储存环束流发射度小，流强高；(3) 软X射线光刻要求光子通量高，即储存环流强高，而束流截面大小并不重要；(4) 时间分辨谱要求光脉冲短，即储存环束团短。

中国科技大学的 800MeV 环设计有几种工作状态，各有不同的束流参数，如小截面、大截面、小发射度、短束团等，以便尽可能满足点光源、高通量、高亮度、短脉冲等不同要求。

3. 采用插入元件

在早期，所有的同步辐射研究都是使用来自弯转磁铁的辐射。近年来，人们开始在环的直线节里插入一些特殊磁铁以扩大实验能力。这些插入元件主要是 Wiggler、undulator、自由电子激光器三种。

(1) Wiggler Wiggler 的作用是利用局部强磁场把同步辐射谱向短波长方向移动，同时也提高辐射强度。图 7 表示在 Wiggler 中电子的轨迹。电子进入 Wiggler 以前和离开 Wiggler 以后仍循同一直线。Wiggler 有常规磁铁和超导磁铁两种。一般只有几个波。

(2) undulator undulator 的作用是产生高强度的准单色光，强度可以比弯铁中的辐射高 $10^2 \sim 10^4$ 倍。电流方向相反的双绕超导螺线管可构成螺旋 undulator，而永久磁铁可构成平面 undulator。undulator 场强不高，但波数很多，有上百个波。螺旋 undulator 辐射圆偏振光，平面 undulator 辐射线偏振光。

undulator 产生的准单色光波长为^{[5], [7]}：

$$\lambda \approx \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left[1 + \gamma^2 \theta^2 + \frac{K^2}{2} \right]$$

这里 λ_u 为 undulator 磁场的波长，改变 λ_u 可以得到不同波长的准单色光； θ 为观察方向与电子平均方向的夹角； K 是与 undulator 的磁场强度和几何条件有关的参量， $K=1$ 时辐射最强。

准单色光分数带宽 $\Delta\lambda/\lambda \approx 1/N$ ，而 N 为磁场波数。

(3) 自由电子激光器 自由电子激光器实际上是由一个螺旋 undulator 加一对反射镜形成的谐振腔构成的。改变磁铁结构可以得到任何所需波长的激光。

4. 满能量注入

许多实验要求同步辐射的强度尽可能地高，因此储存环的流强应尽可能高。目前很多同步光源的设计都希望达到 1A 流强。由于束流不稳定性，储存环极限流强与注入能量的三次方成正比。因此满能量注入最理想。而且满能量注入的环，随着束流强度减弱还可随时补充注入，每个运行班的平均流强远远高于慢加速储存环，