

纪念中国物理学会成立五十周年文选

X 射线学的现状与展望

许 顺 生

(中国科学院上海冶金研究所)

一、引 言

自 1895 年伦琴发现 X 射线以来, X 射线物理学、X 射线谱学以及 X 射线晶体学等分支学科的理论和应用都有很大的发展。目前 X 射线学已渗透到物理学、化学、地学、生物学、天文学、材料科学以及工程科学等许多学科中,并在很多方面得到广泛的应用。

X 射线学作为物理学的一个分支,在物理学的发展史上占有光荣的一页。自 1901 年(该年第一次授予诺贝尔奖金)到 1927 年,就有伦琴、劳厄、布喇格父子(W. H. Bragg 和 W. L. Bragg)、贝克莱(Barkla)、曼·西格巴恩(Manne Siegbahn)和康普顿等七人获得了诺贝尔物理学奖金,体现了 X 射线学在物理学进展方面所起的作用。这就是说,自 X 射线发现到本世纪二十年代是 X 射线学高速发展的阶段。由三十年代至六十年代,虽然在 X 射线貌相学^[1]和 X 射线干涉仪^[2,3]等方面有许多重大进展,但与二十年代以前相比仍大为逊色,在这期间缺少划时代的重大突破,以致有人认为 X 射线学特别是 X 射线晶体学和 X 射线谱学等学科已经没有什么很大的发展前途,只不过成为一些常规的检测手段而已。但从七十年代以来,由于出现了一些重大的发明和改革,使这门学科获得了新的生命力。这些发明和改革主要表现在新的 X 射线源和探测系统等的出现,以及高速、大容量电子计算机的广泛应用。下面就这些方面以及它们对 X 射线学所起的促进作用作一简要介绍。

二、X 射线与物质的相互作用

X 射线是一种波长很短(约在 10^{-2} 至 10^2 Å 之间)的高能量电磁波,具有明显的粒子与波动二象性。它和物质相遇时主要是与物质中原子的核外电子相互作用,发生各种弹性和非弹性散射、X 射线吸收、核外电子能级跃迁、光电效应等,导致入射波能量、动量的变化,产生相干和不相干的散射波和荧光辐射,以及光电子、反冲电子、俄歇电子发射等。测定它们的方位、振幅、强度、波长(频率)、能量、动量、产额等,可

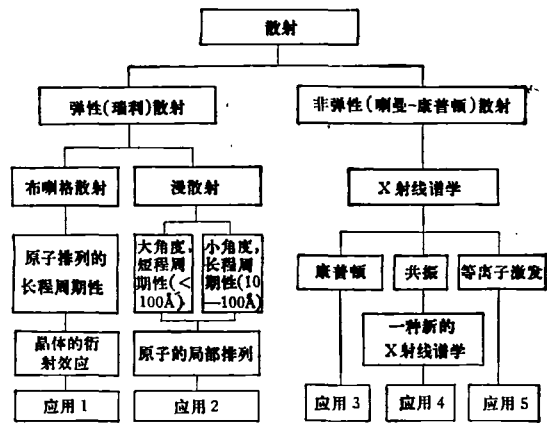


图 1 X 射线和物质相互作用时的散射现象及其应用^[4]
 应用 I 包括: (1) 晶体结构(物相分析,相变,薄膜结构); (2) 晶体取向(取向测定,织构); (3) 晶体缺陷(形变,残余应力); (4) X 射线貌相(晶体及缺陷的衍衬图象) (5) 磁结构。应用 II 包括: (1) 固体中原子的偏聚、沉淀; (2) 微观应力场; (3) 非晶态固体、液体、气体; (4) 缺陷(点缺陷,位错,层错); (5) 费米面; (6) 热声子; (7) 回转半径; (8) 大分子的分子量; (9) 生物大分子结构。应用 III 包括: (1) 原子中电子的动量分布; (2) 反康普顿效应。应用 IV 包括: (1) 电子状态的变化; (2) 固态效应; 应用 V 包括: (1) 表面效应; (2) 能量损失过程。

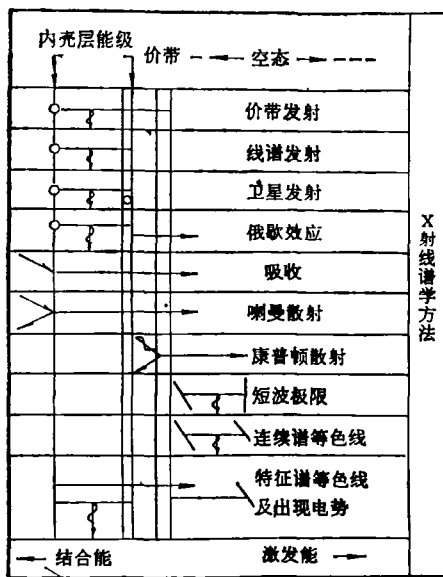


图2 各种X射线谱学方法和结合能与激发能图^[5]

以进行多方面的研究。有关散射的类型及应用见图1中,各种X射线谱学方法见图2。

三、X射线设备方面的新进展

1. 新的高强度X射线源

(1) 旋转阳极(转靶)X射线发生器^[6]

由于高速旋转系统的真空及水密封问题得到解决,使得这类发生器的生产成为可能。目前由它们所发出X射线的功率水平是由十几千瓦至一百千瓦左右,比封闭式X射线管的功率高1—2个数量级。现在在一些国家已有各种不同功率的商品出售。

(2) 电子同步加速器辐射^[7-9]

这是七十年代开始利用的辐射源,简称“同步辐射”或“SOR”。利用电子在作加速运动时能辐射电磁波的原理,可以在这类加速器中获得波长在X射线波段的强电磁辐射。若将直线加速器中具有一定高能量的电子注入到电子同步加速器轨道中,那末经过几个毫秒电子就可加速到很大的速度,获得很高的能量。所得到的X射线是脉冲间歇式的,具有一定的时间结构。假如将这种同步加速器的高能电子再注入

到储存环中,在环中进一步加速到接近光速,并继续循环旋转,其束流的半衰期可达数小时,辐射相当稳定,并具有准连续性,非常适合于作为强功率的X射线源。所辐射出的电磁波波长与受加速电子的能量有关。同步辐射X射线具有很宽广的波谱,可包括自小于0.1 Å到几千Å的连续辐射。当电子能量为3—7GeV时,辐射出的电磁波波长峰值在Å的数量级(见图3)。

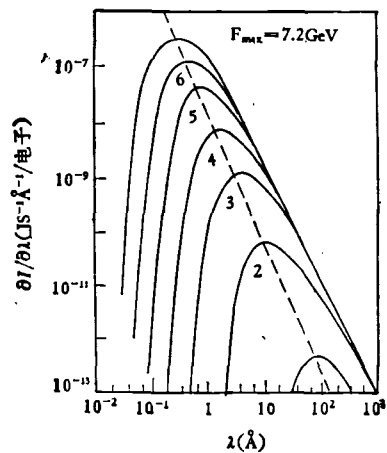


图3 西德汉堡电子同步加速器(DES Y)中不同能量的加速电子辐射出电磁波谱的强度分布^[9]

同步辐射的优点是:

(a) 通量大,亮度高:通量和亮度约为常规X射线源的 10^3 — 10^4 倍以上。由于亮度高,所以曝光时间极短,约为 10^{-1} — 10^0 秒数量级,因此可以进行实时观察、拍照及动态研究。

(b) 具有连续可调的波谱:由于同步辐射的频谱带宽广,含有连续的各种波长,并可用单色器进行单色化,因此适合于多种用途。用这种高强度连续谱进行X射线貌相研究甚为方便,可以不必对晶体取向进行调整,底片到试样距离也不必很近,因此有较大空间可以附加磁场、应力和温度等附件。Tuomi等首先对此方法进行了尝试,所得貌相图是一个劳厄花样,可以任意选择其中一些斑点,观察一系列不同反射面斑点中的衬度变化和消象规律,定出位错的Burgers矢量及其它缺陷的应变矢量。由于光阑长、光斑大,故试样及底片不必扫描。但在这种劳厄斑点中,不同级数的反射重迭,图象

诠释较难。用这种辐射的长波部分经过单色化后,特别适合于小角度散射工作,能研究非常微小的粒子质点,并能避免双布喇格反射的干扰。

(c) 具有特定的时间结构: 可对许多现象进行瞬时或动态观察、研究,有极好的时间分辨率。

(d) 准直性好: 同步辐射集中在一个很小的立体角 ϕ 内, $\phi = \frac{m_0 c^2}{E}$, 其中 m_0 为电子的静止质量, c 为光速, E 为电子能量。由此可见,当电子的能量愈高时辐射的立体角愈小,准直性愈好。当辐射波长为 1 \AA 时, ϕ 约为 0.2 mrad , 因此有很好的准直性,在距光源 $10-30 \text{ m}$ 外,得到一个水平的辐射带,其垂直高度仅有 $2-5 \text{ mm}$ 。

(e) 平面偏振性好: 辐射几乎完全是平面偏振波,偏振面在电子回旋轨道平面内。

同步辐射的缺点是:

(a) 设备庞大复杂,费用极高。

(b) 实验系统(包括设备和试样)发热和辐射损伤问题需要注意解决。

(c) 设备主要用于高能物理研究,对 X 射线工作不一定合适。但目前一些国家已为发射电磁辐射而建造一批专用的加速器和储存环。

同步辐射的基本实验方法是将加速器或储存环内的连续电磁辐射引出窗口,通过一个长达数十米的真空管道系统,其两端可用铍窗口封闭,然后按通常的方法进行实验布置及操作。如需用单色辐射时,可用石墨、铜等晶体单色器反射获得。

(3) 脉冲 X 射线发生器^[10,11]

利用脉冲电子源,在热阴极(接地)或场发射冷阴极管中产生 X 射线脉冲,为单脉冲发射,每个脉冲的持续时间为亚毫秒到微秒数量级,也具有特定的时间结构。辐射的瞬时强度很大,当管电压为 50 kV 时,管电流可达 1000 mA 以上。连续和特征辐射的产率均随电子能量的增加而迅速提高。在持续 $10 \mu\text{s}$ 的一个脉冲中,单色辐射的通量可达 10^7 光子,能够替代

同步辐射,进行冲击波压缩下材料瞬时结构变化等实验^[11]。

利用高功率激光打靶产生的等离子体,也能得到毫微秒脉冲的 X 射线谱线(简称为 LPX),拥有极高的瞬时强度,可以用来分析高度瞬态结构,例如化学反应的中间体或分子的受激电子态等。

(4) X 射线激光器^[12,13]

激光光源具有很高的强度、单色性和准直性,因此相干性极好,如能制成 X 射线波段的激光器,则可能成为极为理想的 X 射线源,目前已有不少人在进行这方面的研究与探索工作。1972 年,Keppeler 等曾宣称已经获得波长为 1.54 \AA 及 4.2 \AA 的硬 X 射线激光,但实际上对其波长并未能进行精确测定。据报道这种“X 射线激光”是用功率为 10^9 W 的激光器产生的激光来轰击夹在两层玻璃片中的硫酸铜明胶而得到的。但根据同样的实验布置,无法在别处重复他们的实验,因而受到怀疑,现在已经基本上否定。此后,虽然另有许多人先后提出过十多种可能产生 X 射线激光的机制,但到目前为止均未成功,其原因可能是由于目前光学激光器的功率水平还不足以产生真正的 X 射线激光。随着光学激光器功率的继续提高, X 射线激光器不是没有可能制成的。

据报道,美国 Lawrence Livermore 实验室已在 1981 年用小型核爆炸产生波长为 14 \AA 的 X 射线激光,但详情尚未公布。

2. 新型探测器

(1) 固体探测器^[14]

应用锂漂移半导体硅(Li)、锗(Li)或本征锗等探测器,在固定角度接受晶体样品对连续辐射的衍射及荧光激发,经过放大后利用多道脉高分析器对衍射及荧光辐射的能量进行分析,可以构成一个能谱系统,如图 4 所示。这种探测器测量 X 射线能量及强度的原理是:由于反射及荧光 X 射线光子在低温的固体探测器中激发产生电子-空穴对,所产生电子-空穴对的数目与所吸收光子的能量成正比,它们分别受到加偏压的探测器两极吸引而形成脉冲。使用

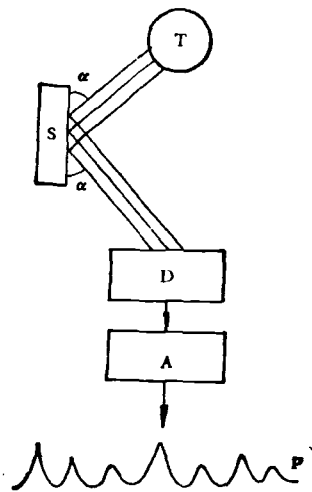


图4 X射线能量色散系统示意图

T—X射线管；S—试样；D—固体探测器及放大器；A—多道脉高分析器；P—荧光谱和衍射谱

这种探测器的优点是结构紧凑，不需要一套扫描的机械装置，因而避免了由机械装置所带来的仪器误差。它能同时接收到由样品发出的所有荧光及衍射谱线，可以不经扫描同时进行结构和元素分析，因此实验速度大大提高。分析的精度受探测器的分辨率及多道脉高分析器通道数目限制。目前一般使用1024—4096通道，Si(Li)探测器的能量分辨率约为160—200 eV (对 MoK α 光子, 分辨率约为1%)。缺点是对不同能量的光子响应不均匀，同时线性响应区较小。按目前探测器的水平，从衍射谱确定晶面间距 d 的精度大约相当于 $0.05-0.10^\circ (2\theta)$ ，在进行对 d 值精度要求不太高的定性分析工作时，采用这种探测系统是十分有利的。

(2) 位置灵敏正比计数器^[15-17]

位置灵敏正比计数器简称位敏探测器，现在常用的是线状位敏探测器，它是在一般正比计数器内安放一根细长的高电阻轴丝而制成。由于正比计数器在接收光子产生局部雪崩后形成的脉冲向计数器两端输出，不同位置处的脉冲与两端距离不等，因此两脉冲间产生一个时间差。如光子进入点与端点距离愈远，则脉冲波形畸变愈大。比较两端脉冲波形，可以利用一套电子装置求出产生脉冲的位置。目前位敏

探测器的空间分辨率约为0.1mm数量级；如在有的实验中，当计数率为 10^5 脉冲/秒时，空间分辨率约为 $160\mu\text{m}$ 。用这种探测器进行小角度散射等工作，所需实验时间比照相机要低两个数量级。

(3) 平面计数器(多丝正比计数器)^[18]

将正比计数器中许多阴极轴丝(可为不锈钢丝或镀金的钨丝)每相隔1—2mm平行排列，在它上面再按垂直方向平行排列第二层，构成一个平面计数器。当光子在一定位置入射时，被二层中各一个轴丝所接收，从而能够确定光子的人射坐标。在一个平面上同时记录各点的人射位置和强度，得到二维图象。这种计数器目前已成功地用在劳厄法及小角度散射等工作中，其空间分辨率大约为0.2mm，相当于一张粗乳胶颗粒的照相底版，但灵敏度却要高得多。利用同步辐射进行小角度散射实验时，由于试样与探测器之间的距离很大，对这种探测器的空间分辨率可以降低要求，如在西德的 DESY 装置中进行小角度散射实验时，其探测器每层有128条轴丝，丝间距为2mm，仍能得到很好的角分辨率。

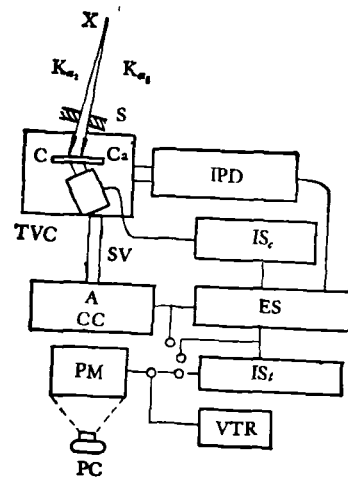


图5 图象直接显示系统的示意图

X—X射线源；S—狭缝；C—晶体；Ca—小车；TVC—电视摄像机；IPD—象位探测器；SV—同步显象；A—放大器；CC—摄像机控制；ISc—间歇扫描；ES—电狭缝；PM—图象监视器；ISr—象储存器；VTR—录像机；PC—光学照相机

(4) 图象直接显示^[19,20]

在常规探测器(照相底板或计数器)处安放氧化铅(PbO)摄像管或硅靶(硅二极管阵列)等X射线摄像管或象增强器,再与电视系统连接,就可以将衍射图象直接在屏幕上显示,进行实时观察。目前这种设备的最佳分辨率可优于 $10\mu\text{m}$ 。图5是千川(Chikawa)等^[20,24]所发展的图象直接显示系统的示意图。图象可在监视器PM的显象管上直接观察,或通过光学照相机PC拍摄“直接显示象”,它包括由 K_{α_1} 和 K_{α_2} 辐射同时造成的象,也可以经过电狭缝ES及象储存器IS后,拍摄只由 K_{α_1} 辐射形成的Lang扫描貌相图(“合成显示象”)。

四、分析与应用

高强度X射线源的出现,使X射线工作效率提高 10^3 倍以上,而新型探测器的使用又可将工作效率提高约二个数量级,因此总的效率提高达五个数量级以上;再加上高速度、大容量电子计算机的广泛使用,从而使X射线学获得了其它学科难以达到的条件。在这种形势下,主要属于实验物理学范畴的X射线学应会再一次出现新的突破,在理论和应用方面都应有新的飞跃。目前X射线学的分析和应用方面有下列一些新的内容:

1. X射线衍射、光谱分析以及放射医学等常规测试工作的计算机化

利用计算机程序控制和计算,已经使得不太复杂的晶体结构分析(包括单晶及多晶样品衍射强度的收集,衍射斑点及线条的指标化,结构分析计算和原子坐标位置的确定等)成为经常性的测试工作,并能在各种给定的条件下进行实验。在物相分析方面,为了适应计算机的要求,常用的JCPDS粉末衍射卡组(PDF)(其前身是ASTM卡组)已转向打孔卡,便于计算机检索^[21,22]。为了使 d 值和强度值统一,已采用计算的 d 值代替测量值,并用内标进行校正。强度也采用参考标准(常用 Al_2O_3)的方法,代替以前卡片中大量使用的目测和强度条分级等

物理

方法,便于对照。低级对称晶体的定向工作借助计算机程序后,可大大节省尝试的时间。织构测定也可以利用计算机程序控制,自动收集扫描的衍射强度,测定三维取向分布函数(ODF),并直接绘制彩色的极图和反极图。其它如点阵常数的精确测定、线形分析以及荧光分析和微区成分分析(电子探针X射线微分析)的定量计算等,也都可以全部计算机化。

在医学上发明了利用电子计算机辅助的X射线断层照相法(X-Ray tomography)^[23],对人体内部检查极为有利,是放射医学上一项重大贡献。Cormack和Hounsfield^[24]因此而获得了1979年诺贝尔医学和生理学奖金。

2. 衍射花样和衍射象的高速拍摄、实时观察和样品的动态研究

利用上述各种高功率、高亮度X射线源和新型探测器系统,就可能进行各种衍射花样及衍射貌相的实时观察和高速拍摄,拍摄速度为秒(或更小)的数量级,因此能够研究瞬时现象和进行连续变化现象的动态观察。利用这种装置,可以进行相变动力学的研究和在外加应力场的作用下晶体缺陷的生成和运动的动力学的研究(图6),以及晶体生长过程的动态研究等。它还特别适合于对生命科学样品进行瞬时研究,在这种高速的实验条件下,生物活组织可以继续存活,因而能够获得前所未有的信息。千

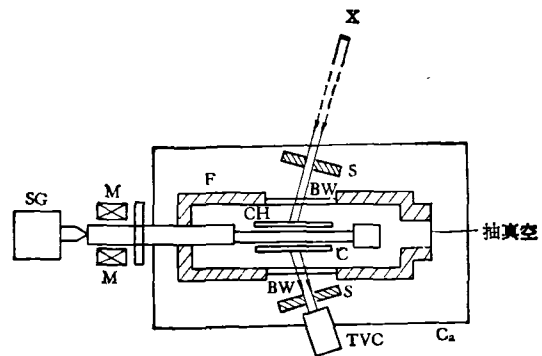


图6 观察位错运动的X射线照相法示意图

X—X射线源; S—狭缝光阑; F—加热炉;
BW—铍窗口; CH—碳加热器; C—晶体;
TVC—电视摄像机; Ca—小车; M—磁
铁; SG—应变仪

川等曾用高功率转靶X射线机(功率为60kV, 500mA, 焦点尺寸为 $0.5 \times 10 \text{ mm}$)及电视装置进行过硅单晶生长过程的研究, 在原位观察到了晶体熔化及结晶的全过程。MacCormack等^[25]和Castaldi等^[26]利用同步辐射进行了金属材料原位再结晶及晶粒成长的研究和退火孪晶生长的观察。此外还可以研究材料在冲击波载荷下爆炸破裂过程及结构变化等。Barrington Leigh等以及欧洲分子生物实验室(EMBL)的Stuhrmann等^[27]利用同步辐射进行了一系列生物活组织的小角度散射等工作, 取得了新的结果。

3. 漫散射研究

漫散射的强度一般很微弱, 与背景强度的信噪比很低, 实验分析困难, 因而长期以来进展缓慢, 然而应用了强光源、新型探测器、大容量计算机以及极低温技术后, 就能够研究一些以往忽略掉或有意避免掉的漫散射规律和分布。进行温度漫散射实验可以测定各种物质的特征温度等热学性质, 还可测定原子间内聚力以及晶体缺陷和声子的相互作用等。点缺陷的实验研究过去一直是X射线衍射学的禁区, 关于稀固溶体中杂质原子点缺陷无规统计分布的X射线散射理论, 虽然早在四十年代时就由黄昆教授^[28]提出, 但到七十年代才经实验完全证实, 得到应用^[29]。图7是这种实验的设备布置简图和结果示例。根据衍射线条尾部强度的细微变化(相当于布喇格倒易阵点附近位移应力场的强度分布), 能够通过分析计算, 探测晶体物质中一定浓度间隙原子或空位的统计分布规律以及各向异性等情况。此外, 漫散射方法一向是研究晶体材料中原子偏聚及短程序的重要手段, 近年来在非晶态物质的结构测定方面也发挥了重要作用。小角度散射的研究更开创了生物大分子研究方面广阔的前景。

4. X射线谱学方面的新进展

紧接着1912年劳厄等发现X射线衍射现象后, X射线谱学就和X射线晶体学一道迅速发展, 取得了许多成就。近年来由于新技术的采用, 使得一些根据非弹性散射而发展的

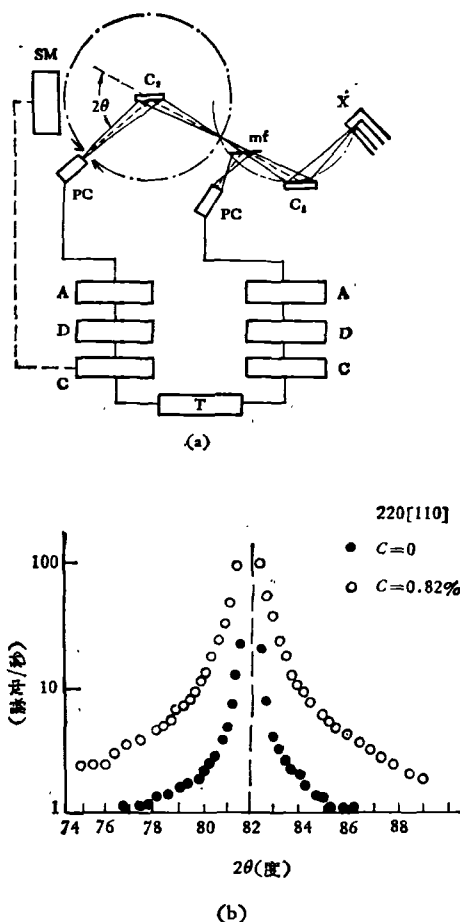


图7 黄(昆)散射的实验布置及结果示例

- (a) 实验布置: X—X射线管; C_1 —单色器晶体; C_2 —试样; mf—监控用薄膜; PC—正比计数器; SM—步进马达; A—放大器; D—甄别器; C—计数器; T—打印机;
 (b) 掺氧铌试样的黄散射: C—缺陷浓度(含氧量)

X射线谱学中新的分支(见图1)取得了新的进展。如在喇曼散射实验中利用一定能量和动量的光子激发物质原子中的内壳层电子到费米能级, 可以导致软X射线谱中吸收限和发射限形状的改变, 从而能给出金属及其它物质原子中电子态变化多体效应的信息。测定康普顿散射轮廓可以研究物质中电子的动量分布, 由于这种方法几乎只反映物质原子中外层电子的运动状态, 而对内层电子很不灵敏, 因而很少受到内层电子的干扰, 能够提供原子中外层电子运动的细节^[30,31]。用X射线光子或电子透射薄膜样品或从样品表面反射, 可以在样品中激发产生

光电子和等离子体激发。若入射能量在样品原子吸收限附近,则光电子动能很小,电子电荷与等离子体振荡的静电场起伏耦合,反射或透射电子将产生能量损失,测量入射光子或电子的能量和动量变化,可以研究物质中的能量损失过程及表面效应。利用入射线波长接近样品中元素的吸收限,产生共振散射,引起反常色散,使散射因子成为复数的特性,可以测定各种元素的散射因子修正,并能解决晶体结构测定中的相角问题。

软X射线谱学虽已有多年的历史,但只有到了利用同步辐射或其它强光源中的软X射线以后,才有了新的发展,用它可以很有效地研究样品中各种原子在化合时的价态、离子性及局部电子组态等。软X射线在样品中的穿透深度约在 $10-1000 \text{ \AA}$ 之间,对研究金属及合金的氧化层等表面现象甚为有利,可以探测表面电子能谱所不能达到的深度。用这种方法测量谱中由于化学态改变而产生的变化,可能比俄歇电子能谱仪(AES)或X射线电子能谱仪(XPS或ESCA)的结果更为明显,而且不受样品表面氧化物电荷的影响。

若用较低能量的电子激发由样品制成的阳极靶子,同时改变阳极电位,可由靶子上发出软X射线。当轰击靶子的电子能量达到某一定值时,样品材料中会出现特征荧光X射线发射突然增加,即在某一特定阈值时,光电倍增管中的电流突然增大,并可能显示出某些细节。将这

种荧光X射线产额对阳极电位作图,称为软X射线出现电势谱(soft X-ray appearance potential spectroscopy, 简称为SXAPS)图^[32,33]。在特征X射线出现的电位,谱图的斜率出现突变。这种谱仪的核心部分的构造如图8所示。用SXAPS可以测定固体样品表面的化学成分,它比俄歇能谱仪的图谱更为简单,但对不同元素检测的灵敏度变化较大。SXAPS也可以用来测量样品原子中的电子结合能以及电子的能带结构,但准确性较差。由于这种谱图中有一个特定的阈值,因此也可能和物质中的多体效应有关。

5. 扩展吸收谱精细结构和X射线吸收的近吸收限结构

在一种已知原子吸收限高能量一侧,研究透射X射线强度涨落的现象(即X射线吸收系数的振荡结构)就是扩展X射线吸收谱精细结构(extended X-ray absorption fine structure),简称为EXAFS(图9)^[34]。它不但和吸光原子(样品)中的电子态变化有关,还能给出该原子周围近邻原子的品种、平均距离和配位数,因此可以认为是X射线谱学和X射线晶体学的结合。扩展区(或称广延区)主要是指高于吸收限能量 $30-1000 \text{ eV}$ 处,在这一区间,入射线穿过样品后强度的变化主要是由于光电子被邻近原子中电子势场散射所引起。物质中的原子吸收

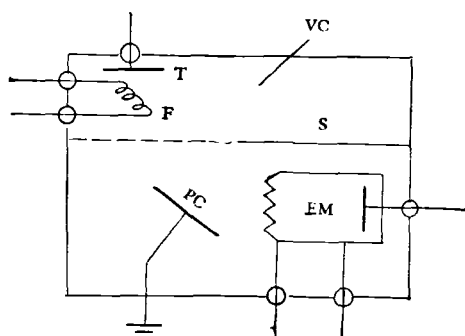


图8 软X射线出现电势谱仪核心部分示意图

VC—真空室; T—靶子; F—灯丝; S—屏蔽; PC—光阴极; EM—光电倍增器

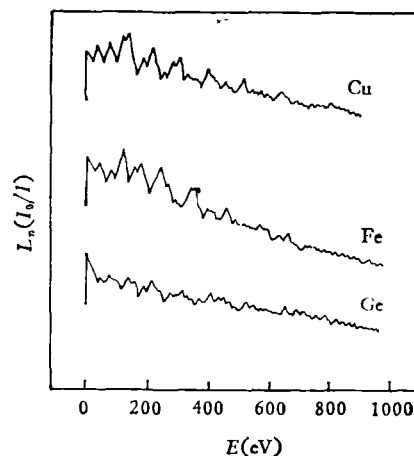


图9 铜、铁、锗的扩展区吸收谱精细结构(吸收限在 0 eV 处)

X 射线光子后产生光电子波, 这种光电子波被周围原子的电势散射后, 又返回迭加在吸光原子的光电子波上, 使它们的运动状态与自由吸光原子不同, 可以认为是一种体内低能电子衍射的过程, 其作用范围约在 10 \AA 以内。在一个含有多种元素的物质中, 可以分别研究环绕某种元素周围的环境, 得到一定的结构信息, 例如短程序状态等。由于不同种类原子的吸收限分开相当远, 所以其 EXAFS 不会重迭。样品并不必需是单晶, 可以是多晶体, 甚至可以是非晶态物质, 包括非晶态固体、液体及其它无序态物质。例如在一块 Fe-Co 非晶态合金样品中, 可以分别研究 Fe 及 Co 的近邻状态。实验时可将一束单色化的入射 X 射线 (宽度约 1.5 eV) 穿过一个电离室, 然后透射放在低温中的样品, 再穿过第二个电离室, 根据入射及透射强度 (均以相对的光子能量为单位) 与光电子能量的关系作图 (图 9), 可以显示吸收限附近的精细结构。将实验结果通过计算和转换, 可以得到物质中某一类原子的径向分布函数, 从而给出吸光原子与近邻间的原子的距离、近邻原子数 (配位数) 等有关数据。由于同步辐射含有超高强度的连续 X 射线谱, 可以经过晶体分光方法, 得到不同波长的单色化入射辐射, 因而特别适合于这项分析工作。用这项技术还可以进行表面结构分析的研究, 即表面的 EXAFS 分析, 称为 SEXAFS。

也可以利用 LPX 进行 EXAFS 的研究工作。这种实验可以分析高度的瞬态结构, 为同步辐射所不及。

另外一种还未被人们特别重视的新现象, 称为“X 射线吸收的近吸收限结构 (X-Ray absorption near absorption edge structure, 简称 XANES)”, 又称为“Kossel 结构”, 它同吸收限本身的波纹状结构有关。它研究的是一种比 EXAFS 更接近于吸收限处 (高于吸收限能量 30 eV 以内处) 的现象, 涉及到缓慢而易被散射的电子。这种电子的散射波在回转过来影响初始的吸光原子之前, 将同其它若干原子发生相互作用。

正如 X 射线谱中反映出来的那样, 电子态包含着有关周围原子排列方式的信息。由于电子和许多原子相互作用才能给出 XANES 信号, 因此有可能用来计算局部对称和键角, 即一个原子和邻近原子间关系的特征参数。而 EXAFS 只包含简单的反射信号, 它不能给出上述的信息。

银和铜晶体的 XANES 都已被成功地研究过, 能够准确地预言 X 射线吸收峰细结构的位置, 并已由实验所证实。

6. X 射线印刷术 (X 射线光刻, X-ray lithography)^[35,36]

利用软 X 射线束进行曝光制版, 可以在大规模、超大规模半导体集成电路以及磁泡等器件制造工艺中快速光刻亚微米图形线条, 受到有关方面的很大重视。在国外该项工作正在积极研究、发展中, 最近并已有一些商品设备问世。这项技术有下列一些特点:

(1) X 射线波长短, 分辨率高, 最小线条已做到 $100-200 \text{ \AA}$, 可与电子束光刻相比美。

(2) 在 $0.1 \mu\text{m}$ 线宽以上时, 有很高的纵宽比 (即光刻胶厚度与最小线宽之比), 比电子束或紫外光刻高一个数量级以上。

(3) X 射线具有强穿透力, 因此对于灰尘并不敏感, 不会因此而产生缺陷图形。

(4) 一次曝光, 不需扫描, 因此生产效率比扫描电子束光刻高得多。

具有超高强度和并行性极好的同步辐射中的软 X 射线谱部分, 是进行这项工作极为有利的光源。

7. X 射线天文学^[37]

宇宙中有许多天体会放射 X 射线, 成为一些很强的 X 射线源, 其波长范围是从软 X 射线 (能量约为 50 eV) 直到很高的能量区, 和 γ 射线及宇宙线的波长范围相接。天体的 X 射线辐射与宇宙中的高能物理过程紧密相关, 故受到有关科学工作者的重视。自从应用了为观察宇宙 X 射线而专门设计的掠入射成像望远镜和高分辨率晶体谱仪, 并发射了专为探测宇宙 X 射线的天文卫星以来, X 射线天文学得到了迅速发展。

展,成为一门新兴的分支学科。美国还计划为了探测宇宙X射线发射更大的天文卫星,而英国、日本及西德也已经发射或计划发射X射线天文卫星。目前利用这些设备探测宇宙中光子能量的分辨率可优于1%。由谱线的强度可以相当精确地测定宇宙天体和星云的温度以及X射线光子丰度。

参 考 文 献

- [1] 许顺生, 物理, 8 (1979), 306.
 [2] U. Bonse, M. Hart, *Z. Physik*, 188 (1965), 154; 190 (1966), 455; 194 (1966), 1.
 [3] U. Bonse, W. Graeff, *X-Ray Optics*, Springer, Berlin (1977), p. 93.
 [4] S. C. Abrahams, J. B. Cohen, *Phys. Today*, 29-11 (1976), 39.
 [5] L. V. A Záróff (Ed.), *X-Ray Spectroscopy*, McGraw-Hill, New York (1974), p. 450.
 [6] M. Yoshimatsu, S. Kozaki, *X-Ray Optics*, Springer, Berlin (1977), p. 9.
 [7] E. E. Koch, C. Kunz, E. W. Weiner, *Optik*, 45 (1976), 395.
 [8] B. K. Tanner, *Prog. Cryst. Growth Charact.*, 1 (1977), 23.
 [9] C. J. Sparks, Jr., *Phys. Today*, 34-5 (1981), 40.
 [10] J. W. Jack, T. Smith, *J. Phys. E*, 6 (1973), 162.
 [11] A. C. Mitchell, Q. Johnson, L. Erans, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 16, Plenum, New York (1973), p. 242.
 [12] G. Chaplin, L. Wood, *Phys. Today*, 28-6 (1975), 40.
 [13] 卢仁祥, 物理, 10 (1981), 91.
 [14] 王天泽, 物理, 7 (1978), 210.
 [15] C. J. Borkowski, M. K. Kopp, *Rev. Sci. Instrum.*, 39 (1968), 1515.
 [16] S. K. Byram, Bui Han, G. B. Rothbart, R. N. Samdakt, R. A. Sparks, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 529.
 [17] A. Gabriel, *Rev. Sci. Instrum.*, 48 (1977), 1303.
 [18] C. Cork, et al., *Acta. Cryst. A*, 31 (1975), 702.
 [19] E. S. Meieran, *J. Electrochem. Soc.*, 118 (1971), 619.
 [20] R. E. Green, Jr., *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 221.
 [21] G. Van Trump, Jr., P. L. Hauff, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 103.
 [22] P. F. Dismore, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 113.
 [23] W. Swindell, H. H. Barrett, *Phys. Today*, 30-12 (1977), 32.
 [24] *Phys. Today*, 32-12 (1979), 19.
 [25] J. B. MacCormack, B. K. Tanner, *J. Appl. Cryst.*, 11 (1978), 40.
 [26] J. Gastaldi, C. Jourdan, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 52 (1979), 139.
 [27] H. B. Stuhmann, *Quart. Rev. Biophys.*, 11 (1978), 71.
 [28] K. Huang (黄 昆) *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 190 (1947), 102.
 [29] J. R. Schneider, *Characterization of Crystal Growth Defects by X-Ray Methods* (Eds. B. K. Tanner and D. K. Bowen), Plenum, New York (1981), p. 186.
 [30] P. M. Platzman, N. Tzoar, *Compton Scattering*, McGraw-Hill, New York (1977), p. 28.
 [31] D. G. Kanhere, H. M. Singru, R. Harthoorn, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 105 (1981), 485.
 [32] E. Spiller, F. Feder, *X-Ray Optics*, Springer, Berlin (1977), p. 35.
 [33] H. J. Smith, D. M. Flander, *Japan. J. Appl. Phys. Suppl.* 16-1 (1977), 61.
 [34] P. A. Lee et al., *Rev. Mod. Phys.*, 53 (1981), 769.
 [35] R. L. Park et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 41 (1970), 1810.
 [36] R. L. Park, *Surface Sci.*, 48 (1975), 80.
 [37] H. Friedman, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 13, Plenum, New York, p. 289.

微弱信号检测的意义、内容及进展

陈 佳 圭

(中国科学院物理研究所)

一、前 言

科学技术发展到现阶段,极端条件下的物理实验已成为深化认识自然的重要手段。这些

物理

现象的精密测量以及物质的微观结构与弱相互作用的研究,不仅促进了自然科学的发展,也为国民经济和国防建设创造了有利条件,引起重大的革新。

对于众多的弱物理量(如弱光、小位移、微