

X射线的发现及其对现代科学技术的影响¹⁾

——纪念伦琴发现X射线100周年

李美亚

(汕头大学物理系, 汕头 515063)

张之翔

(北京大学物理系, 北京 100871)

摘要 在X射线发现一百周年之际,本文回顾了X射线发现的历史及其重要意义,简要评述了100年来X射线的研究和应用的光辉历程及其对现代科学技术的发展所产生的巨大影响,介绍了X射线研究的一些最新进展,展望了二十一世纪X射线研究和应用的美好前景。

关键词 X射线,发现,科学技术,影响

Abstract The history of Röntgen's discovery of X-rays is retraced and its impact in the development of modern science and technology over the past 100 years are briefly reviewed. Some recent significant advances are also presented. It is expected that bright prospects lie ahead for the research and development of X-rays in the coming 21st century.

Key words X-ray, discovery, science and technology

1 前言

X射线发现至今,已经整整100年了。

X射线的发现,对物理学以至整个科学技术产生了极为深刻的影响,从而引起了巨大的变革。

X射线的发现及其研究,为物理学、化学、生物学和医学等相关学科造就了数十名诺贝尔奖金获得者,为科学事业的发展作出了不可磨灭的贡献。

伦琴的认真严谨的科学态度和谦逊无私的品德为科学工作者树立了楷模,他是科学工作者的光辉典范。

2 伦琴和X射线的发现

W.C. 伦琴 (Wilhelm Conrad Röntgen), 著名的德国物理学家, X射线的发现者, 1845年3月27日出生于莱茵河中下游的Lennepep (今德国 Remscheid) 镇上。父亲是当地一个纺织品厂主兼批发商, 母亲出生于荷兰。三岁时全家迁居荷兰。1865年又迁居瑞士, 他上苏黎世联邦工业大学机械工程系, 1868年毕业。1869年获苏黎世大学博士学位, 并担任孔脱

1) 1995年1月4日收到第一稿, 1995年3月8日收到修改稿。

(Kundt, A.) 教授的助手。1870 年随孔脱回到德国,次年随孔脱到维尔茨堡大学工作,一年后又随孔脱到斯特拉斯堡大学工作。1888 年任维尔茨堡大学物理学教授和物理研究所所长,在此工作十二年。1894 年,伦琴任维尔茨堡大学校长,翌年因发现 X 射线而闻名于世。由于他的这一划时代的科学贡献,1901 年荣获首届诺贝尔物理学奖金。他把这奖金转赠给维尔茨堡大学,以促进该校的研究事业。1900 年,伦琴应巴伐利亚政府的邀请,迁往慕尼黑,任慕尼黑大学教授和物理研究所所长。1923 年 2 月 10 日在慕尼黑逝世。



图 1 伦琴 (Wilhelm Conrad Röntgen)

伦琴是 1895 年 11 月 8 日在维尔茨堡大学发现 X 射线的。在此之前,赫兹(Hertz, H.)和勒纳德(Lenard, P.)曾经发表过有关阴极射线穿透力的论文。伦琴认为,这方面尚有许多问题未得到解释,需要深入研究。这天傍晚,伦琴重复他们做过的实验。为了避免阴极射线与可见光的影响,他用黑纸板将放电管严密封装,在完全遮光的实验室里作实验。当他着手实验,在管的两电极间接上高压电源时,突然发现,在实验台上离管子一米多远的地方出现浅绿色亮光,是从一面涂有铂氰酸钡的纸屏上发出来的荧光。他感到惊奇。他将纸屏移远些,直到两米多远,都有荧光出现;他把纸屏翻过来,仍有荧光出现。他意识到这不可能是阴极射线,因为管子是被包在黑纸板内,光或阴极射线是不能透过黑纸板的;而且这放电管产生的阴极射线其射程只有几厘米,不可能到达这么

远。对于这种奇异现象,伦琴废寝忘食地在实验室里反复试验。他由实验发现,有一种看不见的射线从管中阴极射线轰击的那个电极发射出来,它在空气中的射程有两米多,而且是直线传播,既不反射,也不会折射,外界磁场也不能使它偏转。尤其使他惊奇的是,这种射线有非常强的穿透本领,能使包在黑纸内的底片感光,能透上千页的书、2—3 cm 厚的木板、15mm 厚的铝板,但透不过几毫米厚的铅板。在更换挡住这种射线的东西时,他惊讶地看到了自己手指骨的轮廓。12 月 22 日,他用这种射线给他夫人拍了第一张左手的照片,照片上指骨清晰,结婚戒指明显可见。经过一个多月全神贯注的实验探索,他确认这是一种闻所未闻的新射线。他把他的发现总结成论文《一种新的射线——初步报告》,于 1895 年 12 月 28 日发表在《维尔茨堡物理学医学会会刊》上。在这篇论文中,他把这种本质尚不清楚的新射线称为 X 射线。1896 年 1 月 1 日,伦琴将论文样本和用 X 射线拍的一些照片分送给当时的一些著名物理学家。1 月 4 日,用 X 射线拍的照片在纪念柏林物理学会成立 50 周年的展览会上展出。1 月 5 日,维也纳的《新闻报》报道了伦琴发现 X 射线的消息,立即轰动了世界。1 月 23 日,伦琴在自己的研究所里作了第一次报告;报告结束时,他用 X 射线拍摄了维尔茨堡大学著名解剖学教授克利克尔(Kölliker, Albert von)一只手的照片。克利克尔带头向伦琴欢呼三次,并建议把这种射线命名为伦琴射线。

伦琴为人谦逊诚恳,是一位有多方面研究成果的实验物理学家,科学研究态度极为认真严谨。早在他发现 X 射线前的十多年里,就有数名物理学家在做阴极射线实验时看到过这种荧光现象,但他们谁都没有去认真注意和研究这一现象。只有在伦琴认真而严谨的深入研究下,才发现了 X 射线。

X 射线的发现,对物理学的发展和科学技术的进步产生了巨大而深远的影响。它直接导致一年后放射性的发现。因此,它标志着现代物理学的诞生,推动了现代化学和现代生物学

的创立和发展,同时为医学提供了价值极高的可靠工具。因此,伦琴作为第一个诺贝尔物理学奖金获得者,确实当之无愧,他为科学家和科学研究树立了光辉的典范。

3 X射线的本质

X射线之所以有这一名称,是因为伦琴在发现它时并没有了解它的本质,因而用数学上普遍接受的表达未知数的X来称呼这一射线。后来人们为纪念他的这一重大发现,又称之为“伦琴射线”。

3.1 X射线的产生

今天常用的X射线通常由X射线管产生。X射线管是在玻璃管内安装灯丝(阴极)和阳极(靶)构成。通电加热灯丝,使阴极发射出大量电子,在两极间加上几十千伏的高压,让这些电子快速飞向阳极;高能电子与阳极靶碰撞的结果,X射线就从靶上发射出来。

由X射线管发射出的X射线一般含有两种成分:强度随波长连续变化的连续谱和波长一定而强度很大的线谱(称为标识谱或特征谱)。

标识谱线很简单,包含的线数不多;所有元素的标识谱都类似,其谱线的波长随阳极靶物质的元素的原子序数有规则地变化,即谱线的波长是元素的特征标志。

标识X射线谱的产生在原理上与光学光谱完全一样,都是由受激原子跃迁到低能级时发射的。所不同的是,可见光是由原子外层电子的跃迁产生的,而标识X射线则是由原子内层电子的跃迁产生的。

连续谱是带电粒子作加速运动时产生的。在高能电子轰击靶时,电子由于很大的负加速度而发射出连续谱的电磁波。这种辐射也称为轫致辐射。

除X射线管作为X射线源外,还有同步辐射X射线源。同步辐射X射线源也是由于带电粒子作加速运动而辐射出电磁波的。电子(或其他带电粒子)在同步加速器内被加速到数千兆电子伏的能量,在转弯时便沿切线方向辐射

出X射线。这种X射线的特点是强度高,波长连续可调,准直性好,而且是完全偏振的。它的出现使X射线科学和技术跨上了一个新的台阶。

另一值得一提的是激光等离子体X射线源。把高功率激光聚焦于靶面,使靶面迅速产生等离子体并转变为高温热辐射X射线源。

3.2 X射线的性质

X射线是波长很短的电磁波,其波长范围约为 $0.01\text{--}500\text{ \AA}$ 。同可见光一样,它既具有波动性,又具有粒子性。

X射线的波动性是由德国物理学家劳厄(Laue, Max von)于1912年发现X射线在晶体上产生衍射现象而首次确认的;粒子性则是1920年美国物理学家康普顿(Compton, A.H.)在研究X射线与电子碰撞时,发现著名的康普顿效应而确认的。

同可见光比较,X射线还有如下特点:(1)在光洁的固体表面不会发生象可见光那样的反射;(2)一般物质对它的折射率都接近1,故在经过物质的交界面时,可认为是直线传播,因而不易转向和聚焦;(3)由于波长与固态物体中原子之间的距离相当,故通过晶体时会发生有规则的衍射,遵守布拉格关系式 $2d\sin\theta = n\lambda$,这也是晶体和材料结构分析的基础;(4)物质吸收X射线可以产生荧光X射线、光电子或俄歇电子等。

X射线与物质的作用如图2所示。

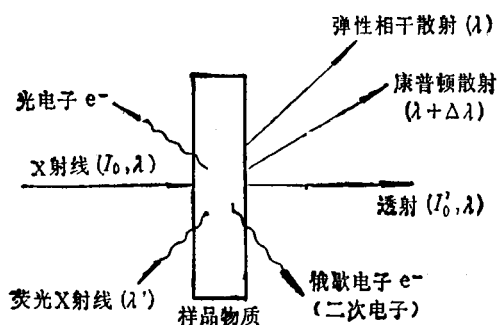


图2 X射线与物质的作用

4 X射线的发现对自然科学的影响

X射线的发现,对自然科学的发展已经产生并且还将不断产生巨大的影响,我们在此简要地谈一些主要方面。

4.1 对物理学的影响

X射线的发现(1895)、放射性的发现(1896)和电子的发现(1897),被认为是世纪之交的三大发现,标志着现代物理学的开端。X射线是三大发现之首,是最先被发现的,并且对紧接在它后面的两大发现都有影响。例如,1896年1月,法国物理学家贝克勒耳(Becquerel, Antoine-Henri)听到发现X射线的消息后受到启发,用铀盐作实验,发现了放射性;由此又导致了居里夫妇(Pierre Curie et Marie Curie)在研究放射性方面的贡献。使他们共同荣获1903年诺贝尔物理学奖。

1912年,劳厄发现X射线通过晶体时产生衍射现象,这不仅证明了X射线的波动性,而且也证明了晶体的点阵结构的周期性(这是在此之前科学家们长期接受却无法证明的概念)。这一发现奠定了X射线晶体学及晶体结构分析的基础。劳厄因此荣获1914年的诺贝尔物理学奖。

布拉格(Bragg, W. and Bragg, L.)父子进一步发展了劳厄的晶体衍射理论,1913年,他们得出了X射线在晶体上衍射的规律:

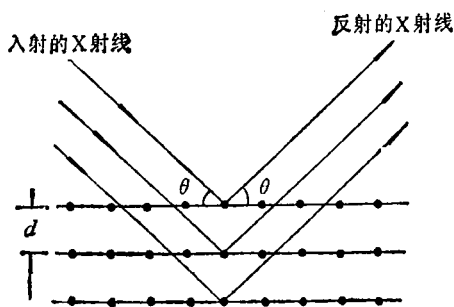


图3 X射线在晶体上的反射遵守布拉格方程
 $2d\sin\theta = n\lambda$

$2d\sin\theta = n\lambda$ (见图3)。这就是著名的布拉格方程。布拉格方程的建立,标志着X射线晶体学理论及其分析方法的确立,极大地促进了X射线晶体结构分析及X射线光谱学的应用和发展。布拉格父子也因此一同荣获1915年诺贝尔物理学奖。

1920年康普顿发现X射线经轻靶散射后波长增长,1923年他用X射线的量子特性对此作了圆满的解释,这就是著名的康普顿效应。康普顿效应是电磁辐射具有量子本性的实验基础,并且证实了能量、动量守恒定律对微观粒子的适用性。康普顿因此荣获1927年诺贝尔物理学奖。

与此同时,X射线光谱学也得到了迅速发展。英国的巴克拉(Barkla, C.)发现了X射线散射过程中产生的次级伦琴辐射(特征辐射);瑞典的西格班(Siegbahn, K.)发现了一系列的这种X射线,确定了各元素的X射线谱,把X射线和元素结构紧密联系在一起,写出了《X射线光谱学》一书,开创了X射线光谱学及元素的X射线分析新领域。他们因此先后获得1917年及1924年度诺贝尔物理学奖。

X射线为我们认识物质世界提供了一个非常有力的工具。X射线与物质的相互作用,尤其是散射作用,给我们提供了原子、分子在物体中的微观排列图象;而X射线光谱学的发展,则为我们认识原子结构的规律性、为原子结构理论提供了直接的实验佐证,同时也使辨别物质的元素成为可能。这使物理学的研究领域从宏观进入到微观、从经典过渡到现代,产生了划时代的进展。

4.2 对化学的影响

与物理学一样,X射线的发现对化学的影响也是巨大的。X射线的发现直接导致了X射线晶体结构分析和X射线光谱学的发展,它们提供了分析物质结构和成分的有效手段,是现代化学多个分支学科的基础及常用的工具。晶体化学与之关系最为密切,无机化学、有机化学也深受其益,在分析化学中X射线更是一种必不可少的手段。

1913年,英国物理学家莫斯莱(Moseley, H.G.J.)通过对各种元素的特征X射线波长的系统研究,揭示了元素周期律的根源不是基于表观上的原子量,而是基于原子序数,即原子内部原子核所带的电荷数(即质子数),阐明了原子序数和原子构造的密切关系。他根据所发现的规律性,正确地预言了周期表中空缺的元素。

1912年劳厄发现晶体对X射线的衍射效应,是晶体学发展史中的一个里程碑。在此之前,即使象NaCl这样简单离子化合物的结构,对化学家来说都是个难题,他们套用有机结构理论中关于原子价和分子等概念而陷入困境。用X射线在晶体上的衍射所作的分析,在1913年解决了离子化合物NaCl和金刚石的结构问题。至此,化学家才明白,在这些简单无机化合物中并不存在分立的分子集团,而是由集合在一起的阴离子和阳离子排列成有规则的空间点阵构成的(如NaCl)。基于这些结构研究,1927年戈尔德施米特(Goldschmidt, V.M.)提出了晶体化学定律,高度概括了决定化合物结构形式的组成者的三个结构要素;随后鲍林(Pauling, L., 1954年诺贝尔化学奖获得者)提出了关于离子晶体结构的五个规则。这些规律对无机化学的发展起了重大的推动作用。后者在70年代又被加拿大的布朗(Brown, I.D.)等晶体化学家进一步发展为价键理论,这一理论对复杂无机化合物的结构化学有重大指导意义。同时,美国无机化学家利普斯科姆(Lipscomb, W.N.)在50年代利用晶体X射线衍射分析,圆满地阐明了硼烷分子的复杂结构,并发展了这类化合物的化学键新理论,解决了许多有关的化学问题,他因此获1976年诺贝尔化学奖。

在结构化学方面,由X射线和电子的发现而开始确立的现代有核原子模型,不仅丰富和深化了对周期律的认识,而且发展了分子理论。X射线是目前研究物质的化学结构最有效的分析手段,所积累的关于分子立体结构的信息也最多。

关于分子结构的大量信息为深入研究有机

反应机理、指导合成和深入探讨有机分子构型及构象与分子化学活性间的内在联系提供了可靠的依据。由于结构分析方法的高度发展,许多天然有机化合物的结构问题纷纷获得解决,使本世纪在有机合成方面取得了巨大的成就。

4.3 对生物学的影响

X射线对生物学的发展,其影响十分重要而且意义深远。

1927年马勒(Müller, H.J.)用X射线人工诱发果蝇突变,是第一个被公认的用人工方法改变基因的事例,开辟了遗传学研究和实际应用的领域,他因此获得1946年的诺贝尔生理学医学奖。

脱氧核糖核酸(DNA),作为一种生物高分子,是重要的生命基础物质,具有储存、复制生物的遗传信息和控制蛋白质合成等主要生物功能。1953年3月18日克里克(Crick, F.H.C.)、沃森(Watson, J.D.)和威尔金斯(Wilkins, M.)等根据DNA晶体的X射线衍射谱,发现了DNA分子的双螺旋结构。这是一个伟大的成就,他们因此荣获1962年的诺贝尔生理学医学奖。随后不久,霍利(Holley, R. W.)、科勒拉(Khorana, H.G.)和尼伦伯格(Nirenberg, M.W.)等根据DNA的双螺旋结构,破译了其上的遗传密码,这是又一个伟大的成就,他们因此荣获1968年的诺贝尔生理学医学奖。DNA结构的发现和遗传密码的破译,标志着分子生物学的诞生,是人类揭开生命之谜的一个里程碑,被誉为本世纪生物学领域中最伟大的成就。

蛋白质结构的测定是X射线分析在生物学中取得的重大进展之一。蛋白质的分子非常复杂,对其结构的测定,曾被认为是一个非常困难的问题。佩鲁茨(Perutz, M.F.)在1953年指出了解决蛋白质分子分析的关键:用重原子衍生物确定相位。他指出,含有一重原子的络合物可以附着到分子的一特定点上;纯的蛋白质晶体的衍射与附有重原子的晶体的衍射不同,两者之间有着可以测量的差值,由此即可推出结构因子 $F(hkl)$ 的相位。1960年,肯德鲁

(Kendrew, J.C.) 首次用重原子同晶置换 X 射线衍射法测定了肌红蛋白的晶体结构。随后分析出的蛋白质结构的数目迅速增加, 到目前为止, 在已经发现的至少数千种蛋白质中, 已经测定了结构的已有数百种。由此对于蛋白质的作用方式及功能已经越来越清楚了, 这大大增进了关于这些生命有机体组分的功能的认识。

X 射线在生物学中的应用, 大大推动了生物学从细胞水平向分子水平的过渡, 从而产生了分子生物学、生物工程学、遗传工程学等当代生物学的新学科。

4.4 对天文学的影响

许多天体不仅发射可见光, 还发射其他波段的电磁波。早在本世纪 40 年代, 就已探测到太阳发出的 X 射线。1962 年美国麻省理工学院的研究组发现了天蝎座的 X 射线源, 随后世界各地的天文台纷纷开展对天体来的 X 射线的研究, 于是诞生了一门新学科——X 射线天文学。

观测天体 X 射线最先用的仪器是 X 射线计数器, 后来为了确定 X 射线源的方向, 在 X 射线计数器前面加上准直器, 构成 X 射线望远镜。目前最好的 X 射线望远镜已达到角秒的分辨本领。为了避免大气的影响, 还将 X 射线望远镜放在人造卫星和宇航器上, 直接观测天体的 X 射线。

对太阳 X 射线的研究使我们认识到, X 射线波段的太阳并不像肉眼看到的太阳那样宁静, 它不仅有缓变, 还有突变, 甚至还有爆发。通过对太阳 X 射线谱和偏振态的研究, 加深了我们对太阳活动区和日冕的结构和物理过程的认识。

太阳以外的 X 射线源是多种多样的, 包括各种类型的天体。属于银河系内的 X 射线源有超新星遗迹、X 射线双星和 X 射线脉冲星等。属于银河系外的有类星体、星系和星系团等。它们发射 X 射线的机制也是各种各样的, 有高温等离子体辐射, 有高能电子加速所产生的辐射, 也有快速转动的中子星发出的辐射; 还有些机制目前尚不清楚。

此外还观测到各向同性的宇宙 X 射线背景辐射、持续几秒到几十秒的宇宙 X 射线爆发以及暂现 X 射线源等。对于它们的来源目前还了解得很少。

X 射线天文学诞生三十多年来, 发现了一系列前所未有的天体, 获得了光学波段和射电波段不能得到的大量信息, 使我们看到了宇宙的另一侧面, 这个侧面比我们肉眼看到的要活跃得多。通过对 X 射线源的研究, 获得了有关天体的物理状态和演化过程等方面的数据, 为天体物理学、高能物理学和粒子物理学提供了地球上无法实现的实验基础。

4.5 对材料科学的影响

本世纪材料科学的迅猛发展, 与 X 射线所作的巨大贡献是分不开的, 我们在此略述如下:

根据劳厄和布拉格的 X 射线衍射理论所建立起来的 X 射线衍射结构分析技术, 是测定晶体材料结构的最有效的技术。它能精确地给出晶胞的形态、大小, 晶胞中原子的种类和分布或电子密度分布等多方面的丰富信息, 并已形成 X 射线晶体学的一整套理论和分析方法。X 射线晶体学代表了 X 射线衍射分析的最具水平和最有成果的方面, 如前所述, 由于某些高度复杂的晶体结构的测定和方法的发展, 曾使多人获得诺贝尔奖金。

多晶材料的分析是 X 射线结构分析的最普遍的方面。无论是固体材料、有机或无机材料、生物材料都适用。粉末 X 射线衍射技术是测定多晶材料的最有效而便利的方法, 目前在世界上成千上万个实验里广泛使用。它可普遍用于测定多晶材料的结构、物相的定性和定量分析及相变的研究。目前已测出数万种无机和有机材料的结构并将其结构参数和衍射数据制成粉末衍射卡, 作为后续的物相结构分析测定工作的标准。此外, 根据 X 射线衍射成形的分析, 还可了解材料的均匀性, 如晶粒度、形变与应力、缺陷分布等结构特征。利用小角度散射强度分布, 可研究测试样品中散射微粒的形状、大小和分布状态, 或纤维、生物大分子或组织的长周期

及取向。

非晶态材料不存在长程序，不能直接用晶态的X射线衍射分析方法。但根据X射线散射的基本理论，利用傅里叶变换，通过对X射线散射谱的强度分布的分析，可以得到非晶态、液态等材料结构状态的原子径向分布函数（RDF），从而求得原子的最近邻、次近邻等的距离、配位数等结构参数。

利用材料对X射线的吸收机制，发展了扩展的X射线吸收精细结构（EXAFS）的结构分析方法。最近进一步发展的X射线近吸收限结构（XANES）方法，适用于测定晶态、非晶态材料的局域原子状态、种类、化学配位、键长等。

近年来由于表面科学的迅速发展，还发展了表面X射线衍射技术，如专用的薄膜衍射仪、双晶X射线衍射技术等。用于研究固体表面及外延晶体薄膜的结构、完整性以及超晶粒等的结构特性。

X射线形貌术可用于直接显示晶体内部缺陷的分布、形状、性质和数量，多用于半导体、激光、红外光学等所用单晶材料的研究。

另一方面，由于每一元素都能在一定的受激条件下发射特征X射线，X射线光谱学是研究各种元素的原子结构及其发射X射线谱线规律的科学。它在材料分析中的应用，直接提供了分析材料组成元素的可靠的方法。X射线荧光分析就是利用X射线束照射样品，使样品中元素受激而发射其特征X射线谱（荧光），并依据这种荧光X射线波长和强度进行分析，从而获得样品中元素及其浓度分布信息。目前它已被广泛应用于各种材料的成分分析中，成为现代常规分析中的重要方法。此外，还可以利用细聚焦的电子束轰击材料表面，根据微区所发射的X射线进行成分的定性或定量分析，特别是它与电子显微镜的结合，可研究微区的元素组成和分布状态以及表面形貌等，已成为研究材料或固体表面的重要手段。

X射线光电子能谱（XPS）则是利用一定的X射线源，将处于原子内壳层结合能较高的（如1S）电子打出来。由于各元素的对应内壳层

电子结合能（XPS谱）值各不相同，通过考察其结合能就可以鉴定样品的化学元素。此外，原子中某给定内壳层的电子的结合能还与该原子的化学结合状态及化学环境有关，随着原子所处分子的不同会有位移，即化学位移。X射线光电子能谱被广泛应用于半导体、微电子固体材料表面、有机分子材料等的元素成分、电子结构及其化学环境的分析。

5 X射线在工业技术和医学领域中的应用

X射线在工业技术和医学领域中的应用非常广泛，我们在此仅举几例如下：

5.1 X射线光刻技术

光刻技术是微电子及集成电路制备加工的重要技术。集成电路的发展要求高分辨率的光刻。X射线光刻技术由于X射线波长短（ $\lambda = 5-50 \text{ \AA}$ ），因而分辨率高，并可消除可见光谱的长波干扰（如衍射）效应，这样就可以采用可控的复制方法，精确转换条宽小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的图形结构。在最佳化条件下，分辨率可达 $0.1 \mu\text{m}$ （理论上可达 $\sim 50 \text{ \AA}$ ），如用同步辐射源的X射线光刻已制出分辨率小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的重版图样。如果将X射线激光用于光刻，则将使高密度的微电子器件、集成电路的大批量加工生产成为可能。可以预料，随着X射线显微技术的发展，X射线光刻技术将会得到更广泛的应用。

5.2 X射线定向技术

X射线定向仪的应用技术，是目前晶体加工切割中重要的定向专用设备。

5.3 X射线在医学上的应用

早在50—60年代，霍奇金（Hodgkin, D.M.C.）等化学家和结晶学家，经过多年合作，测定了在医学上有重要用途的药物如青霉素、维生素B12等的晶体结构，并因此荣获1964年度诺贝尔化学奖。

X射线在医学上普遍应用于疾病和检查诊断，并已形成了X射线诊断学的专门学科。其中最主要而普遍的应用是利用X射线穿透人体

后形成的影像来检查诊断(透视、拍片)。它是利用人体的不同器官组织、部位及生理或病理的不同状态对X射线的不同吸收来形成影像,从而诊断出疾病的发生部位、种类及程度的。借助于现代的科学技术的帮助,X射线的成像诊断已被广泛用于胸、肺、心脏、胃肠道、骨和关节等内外科的疾病论断中,成为一种简便、快速而可靠的常规检测手段,它为全人类的疾病诊治、保健的医疗事业作出了不可估量的贡献。

70年代问世的计算机X射线层析成像技术,即通常所说的CT(Computerized Tomography)或XCT,是X射线在医学诊断上应用的一个新里程碑,它是根据投影重建的数学理论,利用计算机技术,将X射线透射信息重建成为三维影像的技术。它将体外所测的人体某一特定横断面的组成形态或病理变化的大量X射线透射强度数据,用无重叠的二维图像形式表示出来,一系列的不同横断面的二维图像便构成了该部位的三维立体像。

长期以来,X射线成像方法只能得到立体结构的平面像,使重叠的或密度相近的组织不能分辨,因而诊断受到很大限制。XCT解决了这一难题,使三维立体成像得以实现。由于这一重要的发明,美国物理学家科马克(Cormack, A.M.)和英国电子工程师豪恩斯费尔德(Hounsfield, G.N.)共享了1979年的诺贝尔生理学医学奖金。

6 X射线研究的最新进展

近年来,X射线的研究在很多方面都不断地取得新的进展,我们仅举两例说明如下:

6.1 X射线显微镜

X射线显微镜是用X射线作光源进行显微放大和分析的显微镜。根据其设计原理的区别,一般有四种类型:即接触型、成像型、扫描型和全息型。其中成像型是用聚焦系统(费涅耳波带片或掠入射全反射镜系统)将影像放大数百至千倍,然后将其记录下来,如透射X射线显微术(TXM);扫描型则是类似于扫描电镜

的原理,只是用X射线聚焦束代替电子束进行扫描;全息型则是基于波的全息干涉原理,获得样品的三维全息相。

X射线具有可见光和电子所没有的特征,作为显微镜的光源有独特的优越性。第一,比可见光的波长短,可以提高分辨率,如用 $\lambda = 5-50 \text{ \AA}$,分辨率最高可达 $30-50 \text{ \AA}$;第二,在元素吸收端波长前后有剧烈的吸收变化,利用这种吸收差的分析,可用于识别元素及其在样品中的分布图像;第三,利用荧光X射线显微术(FXM)可以进行样品元素成分(尤其是微量元素)分布的定量分析;第四,由于对水或溶液的穿透力较大,可以对活的生物样品进行观察。这正是X射线显微镜明显优于电子显微镜之处。各元素吸收X射线的方式不同,当所用X射线波长在 $23-44 \text{ \AA}$ 之间时,它能穿透水分子,即形成所谓的“水窗”,因而可通过水窗将生物样品中的水作为背景与其他分子分开,使蛋白质、核酸等生物分子得到高反差的显示,使在分子水平上的动态观察成为可能。因此,X射线显微镜的贡献不仅在于提高分辨率,更主要的还在于对生物体在接近自然状态的条件下进行定性和定量测试的能力。

将一个样品的高分辨率X射线像与其光电子光谱结合起来考虑,可揭示该样品的元素分布以及表面的结构及化学状态,这种电子发射X射线显微术(EXM)在表面科学和痕量元素分析中有重要的应用。

可以预料,随着X射线光学元件精密加工技术的发展,以及同步辐射X射线源及X射线激光的应用和发展,X射线显微镜技术将会成为研究物质的显微形态和成分的极为有力的工具。

6.2 X射线激光

X射线激光是指波长 λ 为 $300-0.1 \text{ \AA}$ 的激光。它具有亮度高(增大8至12个数量级)、脉冲短(可达 10^{14} W/cm^2)、相干性好等优点。X射线激光源目前尚处在研制阶段,所依据的原理是由泵浦激光打靶后产生的高温等离子体发出的受激跃迁辐射。其跃迁能级间的粒子数

反转所需泵浦功率密度非常高，这只有在近年来才问世的、脉冲宽度为纳秒 (ns) 或亚纳秒的大功率激光器的条件下才能实现。

X 射线激光全息术是指用 X 射线激光作为相干光源对物体进行全息摄影，获得全息图，然后通过全息图的再现获得微观物体高空间分辨的三维图像的新技术。

将全息术和显微镜结合而形成的激光全息显微术，可用强的脉冲激光在极短的瞬间内 ($\sim 5\text{fs}$) 将物体的信息“冻结”起来，获得反映动态过程的瞬间全息图，通过计算机数值再现这个全息图，可以获得高空间分辨的生物微观结构的三维图象，以便对瞬变物体进行深层次的三维动态分析。这将使人们能够看到活的生物细胞和亚细胞及生物大分子的结构和动力学过程，如 DNA 的摹写、蛋白质核糖体的合成等重要生物过程。从长远看，利用波长更短的 ($1-10\text{\AA}$) 的 X 射线激光全息术进行诸如表面物理、原子分子物理、化学反应动力学等需要高分辨率的快速过程的研究，甚至有可能使人们第一次看到原子尺度上的生命、物理和化学动力学过程。

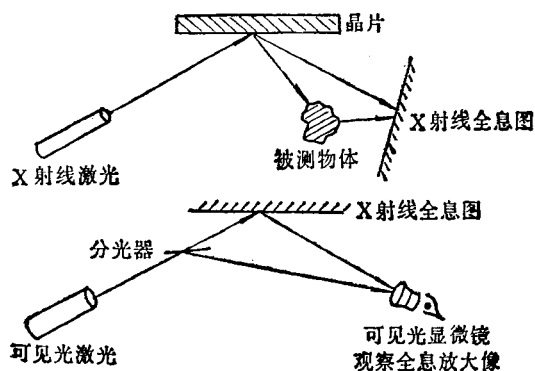


图 4 X 射线激光全息术及其放大示意图

用 X 射线拍摄的全息图可以用可见光再现而获得放大的还原图像，放大倍数为可见光波长与所用的 X 射线波长之比——全息放大 (见图 4)。

将 X 射线激光全息术用于晶体结构分析，可自动解决“相位问题”，将使晶体结构分析得到进一步的发展。

7 展望

X 射线的发现及其研究，已经走过了一百年的辉煌历程。展望未来，X 射线很有可能对二十一世纪的科学和技术产生划时代的重大影响。

新的 X 射线源：同步辐射 X 射线源将得到进一步的发展和應用。激光等离子体 X 射线源的发展将使 X 射线激光成为可能。一些新的 X 射线产生机制将使 X 射线的研究和应用进一步发展。

新的 X 射线光学器件：由于材料和精密加工技术的发展，X 射线的反射、分束、聚焦的光学器件将会很快得到发展，从而使 X 射线激光器、X 射线激光显微镜的研制和应用得到迅速发展。

此外，新思想、新概念、新设计也将给 X 射线带来新的研究和应用前景。

总之，X 射线理论和应用的进一步研究和發展，将对现代科学和技术继续产生重大影响。特别是 X 射线激光的理论和应用的迅速发展，将给二十一世纪的分子生物学、生物遗传学带来全新的变化，使快速简便地测定生物大分子结构成为可能，并最终为人们提供一个分子、原子水平的微观物质世界的生动形象，使人们对微观世界的认识产生划时代的革命。