

上海核技术发展概况 (续完)

吴桂刚

(中国科学院上海原子核研究所)

医用同位素和标记化合物的研制和应用

医用同位素包括医用放射性核素和体内放射性药物制剂。从生产设备上来分有反应堆生产的医用同位素,特别是钼铯和锡铟母牛等发展很快。生产量和产值目前还是以反应堆生产的医用同位素为主。近几年来加速器生产的短半衰期的同位素医用核素和药物发展更快,其品种已超过反应堆的医用核素品种,主要有 ^{123}I , ^{201}Te , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O 和 ^{18}F 等,另外还有放射竞争分析法建立起来的放射免疫药箱,它灵敏度高、特异性强、用血量少、重复性好、正确可靠等,近年发展迅速,国外有60多种,国内已有30多种,上海地区目前可供应20多种。上海原子核所是我国用加速器研制医用放射性核素和放射性药物起步较早、成果较多的单位,其中 ^{123}I , ^{111}In 和 ^{67}Ga 已经卫生部批准可正式投产,并已有小批量投放市场。 ^{201}Te 也已研制成功,1985年供临床前试验后,1986年将可小批生产供应。目前正在准备研制 ^{77}Br 和 ^{18}F 等放射性核素及其药物。据估计目前上海每年至少需要5000毫居放射性药物,1990年需要20万毫居供10万人次使用,产值1000万元以上,所以除了上海原子核所的1.4米等时性回旋加速器部份用于研制、生产、供应放射性药物外,上海准备在最近几年筹建一

台专用于医用核素生产的回旋加速器。同时扩大放射免疫分析药箱的生产供应,争取1990年生产供应5万件,产值可达2000万元。同时对新的制备方法和技术、质量控制的改进提高、临床前后的药理研究等技术进一步开展研究。

标记化合物是生命科学、农业、工业不可缺少的示踪剂。有机体都有碳和氢,所以 ^{14}C 和 ^3H 标记的有机分子和标记化合物应用最广、品种最多,大多用于研究生物体内有机大分子的行踪,以及生理、生化过程。其次是 ^{32}P 和 ^{35}S 的标记化合物,多用于遗传工程、农业、工业、环境科学,研究农药、农肥的药效、肥效,它们的吸收过程、生化过程,以及环境中的残毒余量,污染情况等。目前国外有各种标记化合物1500种,每年更新50多种,产值约1亿美元。国内已有标记化合物300多种,每年供应150多种,更新30多种。上海有标记化合物近200种,上海原子核所占170种,每年生产60种,更新10多种,供全国使用,主要标记化合物品种有核苷酸33种、氨基酸19种、激素13种、中间体50种、农药和药物44种、糖类4种、标准溶液4种、每年生产总强度约2居里。计划扩充人力和生产设备,1990年使产量和品种增加一倍,使产品能在国际市场上有竞争能力。在研究方面,今后还要研究发展新的标记方法和技术,不断研究新的高比度、高强度标记化合物品种,探讨放射性标记化合物辐射自分解的原理及其控制方法,进一步提

高质量控制水平，使其发挥更大的经济效益和社会效益。国内外医用同位素和标记化合物的生产、产值情况可参阅表2。

表2 放射性药物和标记化合物销售统计表
(亿美元)

项目内容	美国	日本	英、法	中国
体内放射药物	1.0	0.3	0.35	0.03
体外放射免疫药盒	3.5	1.2	3.5	0.02
标记化合物	(4000万美元)			40万美元

核辐射仪器仪表的研究和应用

核辐射仪器仪表包括核辐射工业检测仪表、核辐射探测仪表、核医学仪器三部份，它们是由核技术、核电子学、计算机技术综合而发展的新技术。在五十年代后期，由核科学技术的实验室走向工业体系。目前全世界核辐射仪器仪表已有75万台，每年产值15亿美元，其经济效益为每投资1美元可收入10美元左右。我国目前拥有核辐射工业检测仪表1700台左右，核子仪器仪表200多种，年产2万台件，产值6000万元左右，核医学用仪器我国还处于中试阶段，产品不多，主要靠进口。

上海也是我国开展核辐射仪器仪表研究较早的地方。目前在工业检测仪表研制方面有上海原子核所、上海工业自动化所、上海材料所、上海电器所、复旦大学等，生产厂家也有上海电子仪器厂、上海电子管厂、安亭地质仪器厂等，有研究人员100多人。在核子仪器仪表方面，研究单位主要有上海原子核所、复旦大学、七二八研究设计院、交通大学等，研究人员有150多人。研究医用核仪器的主要是上海原子核所，研制的产品有液体闪烁计数器，放射免疫 γ 计数器等。

今后上海在工业检测用核仪表方面，主要是发展各种测厚仪表、密度计、料位计、x射线荧光仪、 γ 探伤仪、地下油管检漏仪等，要使其仪器标准化、插件化，提高精度、自动化程度，采用微机，实现数据自动处理，建立维修和技术服务公司，使核辐射工业检测仪表到2000年时年产1万台件，产值2000万元，科技人员达到1000人。在核子仪器方面主要进行高分辨率Si(Li)x射线谱仪、Ge(Li)和高纯锗 γ 谱仪，特别要重视基于计算机的多道分析器和多维多参量多通道的核物理数据获取和处理系统，也要加强核地质仪器的发展。要使仪器标准化、系列化、插件化、微机化，并建立维修和技术服务公司，

表3 核辐射工业检测仪表统计表

国别	1970年台数	1975年台数	1980年台数	1985年台数	1980年的经济效益系数
美国	3.1万	10.3万	21.5万	30.0万	10
英国	0.5万	0.83万	2.65万	5.0万	7.0
法国	0.53万	1.17万	3.4万	6.0万	8.5
联邦德国	0.5万	1.2万	3.1万	6.0万	2.0
日本	0.21万	0.75万	2.0万	4.0万	2.8
苏联等	5.8万	9.5万	15万	25.0万	5.5
其它国家	3.1万	9.2万	30万	50.0万	4
合计	13.71万	32.95万	77.65万	106万	平均7

说明 1: 经济效益系数是指每投资1美元能收入几美元。

2: 1985年台数是估计数字，不包括核子仪器和医用核仪器。

使核子仪器在2000年时年产5000台件,年产值1000万元以上。核医学用仪器方面,今后重点是微机放射免疫 γ 计数器, γ 照相机和核磁共振断层扫描仪方面。争取到2000年时,上海地区核辐射仪器仪表的产量每年达到约2万台件,年产值5000万元以上,科技人员发展到1500人,可以为国民经济形成2亿元以上的经济效益。国内外核辐射仪器仪表的情况,请参看表3。

核分析技术的研究和应用

核分析技术内容十分广泛。它包括冷中子、热中子、快中子的分析技术,离子束分析技术,利用核物理效应的分析技术,扫描质子微探针分析技术,超灵敏质谱分析技术,同步辐射的x光源分析技术等等。这里对中子和同步辐射光源的分析技术不作介绍,上海地区目前或近期没有这个条件,主要就离子束分析技术及其应用作一简介。

1. 带电粒子活化分析 60年代末上海原子核所就开展了这方面的工作,接着复旦大学也开展了这方面的工作。带电粒子将样品活化成带放射性的核素,从该核素的半衰期和 γ 、 β 射线的能量和强度,即可确定被分析样品的核素的种类和各核素所含的数量。例如用 $^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})^{13}\text{N}$ 反应分析Si基体中的C含量,同时也会产生 $^{28}\text{Si}(\text{D},\gamma)^{30}\text{P}$, $^{14}\text{N}(\text{D},\text{n})^{15}\text{O}$, $^{16}\text{O}(\text{d},\text{n})^{17}\text{F}$ 的干扰反应,但反应产物 ^{13}N 是 β^+ 衰变, $T_{1/2}$ 为9.96分, ^{30}P 的 $T_{1/2}$ 是2.5分, ^{15}O 的 $T_{1/2}$ 为122秒, ^{17}F 的 $T_{1/2}$ 为1.1分,可以用计算机程序对这些反应的衰变曲线进行分解,即可计算出Si样品中C的含量,如用剥层技术,还可得到C在Si中的深度分布。这种方法快速准确,灵敏度高。

2. 瞬发核反应分析 是根据核反应瞬间所产生的出射粒子或伴随的 γ 射线以及出射粒子的不同发射角度,断定其样品中核素种类及数量,并可根据带电的入射粒子在样品中的能量损失而获取核素深度分布的信息。

这种方法特别适用于重元素中含有微量轻元素杂质的微量式痕量分析。例如半导体材料中氧和氢分析非常重要,特别是氢的含量及分布,会对材料性能产生重大影响,而传统的分析方法又无法分析氢。瞬发核反应分析法就特别独具一格,成为其重要的分析手段。

3. 质子激发X荧光分析(PIXE) 用质子轰击样品时,样品中核素原子的内壳电子会电离,其电离截面比核反应截面要大 10^2 量级以上,电离产生的空穴会引起外层电子以一定几率跃迁到空穴中去,此时会发射特定能量的x射线,测量x射线的能量及其峰面积即可算出其元素的种类和数量。它可以对原子序数大于13以上的核素进行多元素的定量分析,灵敏度高,其相对灵敏度可达 10^{-7} ,且取样少,又是无损分析,缺点是不能对 $Z < 13$ 的轻元素进行分析,且无法给出元素的深度分布。

4. 背散射 当入射离子和靶原子核发生库仑相互作用时,一些入射离子会发生大角度的背散射,从已知的入射离子种类、能量和散射角、散射截面、入射离子数、靶原子数、能量损失等参数,可以测得样品中含有什么元素及元素的含量、成份、深度分布等。例如:在制造MOS器件的热氧化工艺中,要适量加氯以提高器件质量和成品率。对背散射可以测量氯的深度分布和氯的含量,从而可以控制MOS器件的质量。

背散射不要标准样品即可给出定量分析,特别适用于轻元素基体中所含重元素的含量分析,这一点正好和质子激发x荧光分析方法互补。

5. 核物理效应分析技术 它包括沟道效应、穆斯堡尔效应、扰动角关联效应、正电子湮灭效应等,它们应用于材料科学、生物医学等方面的分析。

如果分析物质是单晶体,入射束沿着晶轴或晶面方向射入,大多数入射离子会沿着晶格沟道的方向强烈振荡通过,而其它的背散射、质子x荧光等的产额会剧烈下降,形

成**沟道效应**。七十年代初,上海原子核所和上海冶金所协作就开展了这方面的工作。沟道效应可以对晶体中偏离晶格位置的原子进行探测,给出位移原子密度及其分布情况,可用于晶格的辐射损伤,还可对晶格中杂质原子进行定位,从而可以研究半导体材料的离子注入退火,激光退火行为,还可研究异质外延硅层的缺陷密度、深度分布以及研究晶体的表面结构等。

穆斯堡尔效应是指原子核的 γ 射线无反冲地发射和共振吸收,其共振谱线很尖锐,谱线能量分辨本领高,一般可达 10^{-12} — 10^{-13} ,可以给出许多物质微观结构的物理、化学性质。在物理中可用来验证广义相对论光谱线的能量位移,测定核激发态和基态的半径变化,研究晶格结构、弛豫现象,研究传导电子对半导体超精细结构的影响,确定磁转变临界点及易磁化方向等,在化学中可用于研究化学键、价态、自旋态、电子组态、腐蚀机理、热分解过程,研究化学反应机理、反应动力学、反应中间产物以及化学催化剂的结构等。在生物的新陈代谢,蛋白质的结构功能以及地质、矿物学中都有很广泛的应用。

扰动角关联 当一个放射性核素置于磁场或电场中时,该核素通过中间核态级联放出二个光子 γ_1 和 γ_2 ,若其角关联用磁场或电场干扰,则称受扰动角关联。它可以研究固体、液体或气体,而且在高温下和低温下都有高的灵敏度,已广泛用于材料辐射损伤的微观研究,生物大分子的辐射损伤研究,癌症机理的研究等。

正电子湮灭 当正电子遇到电子时即发生湮灭,放出二个能量511KeV的湮灭光子。测量正电子的寿命,可知介质中电子密度的大小。测量二个 γ 光子的角关联曲线可知电子动量横向分量变化,测其湮灭光子的多普勒展宽,可知介质中电子动量纵向变化,可了解介质的结构和性能。这些已广泛用于研究固体材料的结构、缺陷、相变、电子状态,

研究液体、气体状态的变化以及正电子素的化学,研究生理生化过程,血液循环过程。正电子断层扫描的肿瘤诊断,灵敏度、准确度高,对人体无附加伤害。

目前在上海核效应分析在向材料科学和生物科学横向发展,本身技术在向低温、微机化、多参数多通道的数据获取和处理系统发展,并在研制新的放射性核素源。

6. 扫描质子微探针是离子束分析技术的一个新分支。加速器的离子束通过准直和四极透镜聚焦相结合的办法,使离子束流的靶点达到2微米左右,而且还有可能提高到1微米的水平。微束本身可以扫描、或样品进行二维扫描,可获得各种元素在样品表面层的分布图像,其灵敏度极高,有可能分析 10^{-1} 克的元素含量,灵敏度比电子探针要高几个数量级,而且可以在大气或氦气气氛中进行分析,这也是电子探针做不到的。这是1978年后发展起来的新技术,它可以对亚细胞进行微区扫描,可以用于超大规模集成电路的离子束刻蚀,发展三维器件等。目前世界上束点小于 $3\mu\text{m}$ 的扫描质子微探针只有10台,束点达到 $1\mu\text{m}$ 的只有英国和澳大利亚各一台。上海复旦大学的质子探针束点已达到 $10\mu\text{m}$ 。上海原子核所正在筹建束点为 $2\mu\text{m}$ 的扫描质子微探针。主要进行材料科学和生物医学方

表4 上海市核技术应用经济效益估计
(万元)

内容和产值	1990年	1995年	2000年
辐射杀虫灭菌消毒	600	1000	1500
辐照材料改性	400	3000	6000
小型应用加速器	1000	1500	2000
标记化合物和放射药物	100	500	1000
核分析技术应用	100	200	500
核辐射仪器仪表	1000	1500	2000
离子注入技术应用 (生产集成电路等)	2000	5000	10000
合计	5200	11700	23000

说明:没有包括核电站和核供热电站的产值。

面的应用研究。

7. 超灵敏的加速器质谱学 1976年发展起来的加速器质谱学目前正在蓬勃发展，它用在 ^{14}C 断代方面，只需要毫克级的样品即可以对 10^5 年进行断代， ^{36}Cl ， ^{10}Be ， ^{26}Al 也可用来断代， ^{26}Al 的半衰期为 7×10^5 年，可以对几千万年的年龄进行测定。此方法灵敏度高达 10^{-15} ，比普通质谱计高百万倍以上，还可对稳定同位素中的杂质进行分析，如碳中的硼、硅中的磷、金中的铂，还可分析核酸、蛋白质中的微量元素，其发展前景是很令人兴奋的。上海原子核所80年代初即开展了这项工作，采用这种方法，对一些泉水中的气含量进行了测定。并准备进一步开展这

方面的工作。

上海从事的这些核分析技术及其应用还在进一步发展、提高和扩展。上海原子核所改建成的1.4米等时性回旋加速器，引进的4MeV质子静电加速器，不久将安装运转的6MeV串列加速器，以及复旦大学改建成的4MeV质子静电加速器，冶金所引进的1.7MeV串列加速器，这些再配以计算机数据获取处理系统，将为上海地区形成一个核分析基地，特别是离子束分析基地创造良好的条件。

上海发展上述核技术后，到2000年时可为国民经济形成的直接经济效益可参看表4。