

## 离子束分析的新进展

### ——介绍第七届国际离子束分析会议

曾宪周

(复旦大学)

第七届国际离子束分析会议于今年7月7日至12日在西柏林的柏林技术大学召开。这是每两年举行一次的专业性国际学术会议<sup>[1]</sup>。来自36个国家的412名科学工作者向会议提出论文共316篇,参加会议的人数和提出的文章数均居历届之首。从中国去参加会议的共有9人,向会议提出论文共19篇,其中包括特邀报告一篇。

本次会议的主要论题是各种离子束分析技术以及与它们紧密相联系的基本物理方面和辐射效应。

基本物理方面包括离子与物质的相互作用势、阻止本领、截面、歧离、射程等。辐射效应指辐射激发扩散、混合、损伤或缺陷。

可以从下述的五个方面来看这次会议所反映的离子束分析的进展情况:

#### 1. 理论工作向精、细、深的方向发展

在相互作用势方面,波兰学者A. Dygo和A. Tuross在现有的Thomas-Fermi势, Moliere势和Biersack-Ziegler势之外,仿照核结构理论的框架,采用了原子的独立粒子模型(IPM),对于He-Ne和He-Kr系统的计算结果同实验数据符合的情况,比前三种势都要好。印度原子研究中心的A. G. Wagh和S. K. Gupta提出了中间原子势(Interatomic Potential),用它计算的核阻止截面 $S_n$ 比用林哈德LNS近似得到的结果更好,并可更好地解释辐射损伤、溅射以及离子束混合现象。

柏林自由大学W. Krüger博士提出一个低能散射截面的拟合公式,其中引入了两个独立的参数:约化能量 $\epsilon$ 和散射角 $\theta$ 。在 $10^{-6} \leq \epsilon \leq 10$ 的范围内,对所有的散射角计算得到的散射截面的误差小于6%,比林哈德等人的近似结果有较大的改进。西德MPI核物理研究所K. Izsak等报告了他们在低能范围( $\epsilon < 10^{-3}$ )内研究射程与能量的关系时发现,原来的对不同材料的普适关系不再成立,于是他们对单极型材料,金属和离子型固体分别进行了处理。对离子型固体,由于入射离子和固体中离子的库仑相互作用,他们引入了一个附加的阻止机制(Stopping Mechanism),使理论与实验符合得很好。

#### 2. 大型计算机的应用给人以深刻印象

在会上,英国Surrey大学R. P. Webb博士报道了应用大型计算机对固体中的原子碰撞过程进行模拟计算,并采用彩色电影的方式详细而形象地描绘了计算的结果,从溅射、辐射损伤、离子注入深度分布、离子发射等方面对不同的理论模型进行了比较。

#### 3. 各种离子束分析技术的综合使用以及同其他技术的紧密结合

各种离子束分析技术的综合使用,仍然是近年来离子束分析的重要特点<sup>[1,2]</sup>。此外,离子束技术同符合技术、飞行时间方法、超高真空技术、计算机技术等相结合,有力地促进了离子束分析的发展。这在本次会议的316篇论文中得到了很好的反映。

采用弹性反冲探测(ERD)方法时,由

于入射粒子与反冲粒子在靶中的能量损失,使得不同深度上产生的反冲粒子的出射能量存在差异,因而可以从反冲粒子的能谱进一步求得这种反冲核在样品中的深度分布。但是,如果基体中存在同待测核的质量数相近的同位素,则反冲核能谱将相互重叠,难以区分。采用符合技术,选择一定的散射粒子能量、散射角度和反冲角度同反冲核的能量进行符合测量,则实验结果可获得巨大的改善。荷兰S. S. Klein博士报告了利用符合技术同ERD相结合,测量基体中 $^{12}\text{C}$ 的深度分布,可使基体中 $^{12}\text{C}$ 等主要同位素的干扰降低 $10^4\text{--}10^8$ 倍,从而使 $^{12}\text{C}$ 的探测限达到 $10^{14}\text{atoms/cm}^2$ (0.05原子层),深度分辨率达到50nm。

西德J. P. Biersack教授等把符合技术应用于 $(n, \alpha)$ 反应对B和Li的深度分布研究,使探测灵敏度从 $10^{-6}$ 改善到 $10^{-10}\text{--}10^{-12}$ 。这样,即使浓度非常低的B和Li的深度分布,也能用此方法测得。这种符合技术也能用于 $\text{He}(n, p)\text{T}$ 反应对He的深度分布测量,并将获得许多重要的应用。

超高真空技术为高灵敏度的H分析提供了可能。美国纽约州立大学W. A. Larford教授等报告了他们采用弹性反冲探测技术,在超高真空靶室中对H的分析灵敏度已达到几个ppm的水平。

背散射与沟道技术,质子x荧光分析和核反应方法相互补充,各显所长的例子屡见不鲜,并已获得广泛的实际应用。

**4.新的物理现象、新的实验结果的报道,在本次会议上受到很大的关注。人们可以从中看到近年来离子束分析深入发展的势头。**

美国IBM公司研究所的J. F. Ziegler博士报告的微沟道效应(Micro-channeling)引起了人们的兴趣。这是一种远离主晶轴的离子沟道效应,在Si(001)轴附近,实验显现出超过30个平面的和轴的微沟道,与此同时,很多主要方向,如(012)面,并不显示

沟道效应。这些现象与狭窄的高反射率平面引起的沟道合成增强有关,可以通过理论处理加以计算。

美国圣地亚国立实验室S. T. Picraux博士报告了最近发现的应变层超晶格SLS(Strained-Layer Superlattice)的新沟道现象,观察到一种在面沟道粒子波长和超晶格应变层周期之间的共振现象,选择共振条件可以得到灾难性的退沟道或者共振沟道的十分有趣的性质。在理论上,这种现象可以通过相位面的分析很好地加以描述。

荷兰J. Frenken博士等报告了他们在分析Pb(110)表面的结构、动力学和熔化性质时,发现了两个新的表面现象:表面的反常热膨胀,即表面的膨胀系数大于体内的;表面熔化现象,即在接近熔化点而仍然低于熔化点( $T_m = 600.7^\circ\text{K}$ )时,在顶上存在着液态表面层。

著名的法国核分析专家G. Amsel教授报告了他们对于 $^{15}\text{N}(p, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ 核反应的实验研究。在429KeV处,他们测得了很窄的共振宽度 $\Gamma_p = 120\text{eV}$ ,并介绍了这个窄共振反应的许多实际应用。

次级离子质谱(SIMS)虽然目前仍然是表面分析中的一个重要工具,但它存在两个缺点:强的基体效应和对元素的选择效应。在次级中性粒子质谱(SNMS)中,由于采用了后电离技术(Postionization Techniques),这些缺陷被克服了,从而获得了很高的定量分析能力,并与基体无关。这就为各种表面研究提供了更为理想的分析工具。

#### 5.微束方面的研究进展引人瞩目

80年代出现的消色差四极透镜和多极校正透镜系统,加上精细调准技术,使微束的空间分辨率大大提高,现在已有若干实验室突破了 $1\mu\text{m}$ 的大关。会上报道,最近澳大利亚墨尔本的微束系统已成功地获得了 $0.25\mu\text{m}$ 的束点(成象分辨率),这是目前达到的最好水平。同微束相结合的分析手段已从大量采用的PIXE,进一步扩展到RBS, ERD,

NRA等方法,因而可以获得三维的深度分布信息,这是微束研究的另一重要进展。美国圣地亚国立实验室B. L. Doyle博士在会上报道了用微束对材料样品进行三维深度分析的许多精彩例子。例如,第一次公开报道了他们利用3MeV $\alpha$ 粒子的RBS以及4.5MeV质子的RBS分别详细地研究了普林斯顿的托卡马克(Tokamak)聚变试验堆中用的C壁材料。C壁上有一TiC涂层,他们用微束测得了涂层和C壁中Ti的三维深度分布的宝贵信息,发现不仅在表面有一很薄( $<0.5\mu\text{m}$ )的Ti覆盖层,而且存在两个Ti岛,大的Ti岛扩展到 $12\mu\text{m}$ 的深度,小的只有 $3\mu\text{m}$ 深。他们还利用弹性反冲探测方法研究了在Si基体上激光等离子体沉积的Si单晶体,获得了H的三维深度分布信息,并同理论上的结果相一致。对于很薄的样品,利用入射质子束的前向散射可以获得H的三维深度分布信息。墨尔本G. J. F. Legge等人利用这一方法获得了单个红血球细胞中H和C的三维分布图象。D. Heck等人利用 $^{12}\text{C}(d, p)$ 反应对于由超导材料NbCN和C做成的超导电线进行微束扫描分析,得到了C的三维深度分布图象。

探索扩大离子束分析的应用领域,始终

是激励离子束分析向前发展的重要推动力,而离子束分析技术同符合技术、飞行时间方法、超高真空技术、计算机技术以及其他各种技术的结合,各种离子束分析方法的综合,基本物理数据的精确化,理论模型的完善,新的物理现象的揭示等等又反过来提高和扩大着离子束分析实际应用的深度和广度。从本次会议的大量报告中可以看到,离子束分析的应用不仅遍及半导体、氧化、腐蚀、机械,而且扩展到艺术品、考古、地质、空间科学、生物、医学、环境保护等等领域。

下届离子束分析会议将于1987年在南非召开。离子束引起材料改性会议,将于1986年6月在意大利Cataria召开。粒子-固体相互作用的戈登会议,将于1986年在美国召开。不言而喻,这些会议都将对离子束的研究和应用起促进作用。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨福家,核技术 6, 69(1983)
- [2] Proc. of 6th Int. Conf. on Ion Beam Analysis, Arizona, USA, Nucl. Instr. and Meth. 218(1983)