

建议用最大直径法。

- [1] B. B. Mandelbrot, *Science*, **156** (1967), 636.
- [2] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman San Francisco, (1983), 1—461.
- [3] C. W. Lung, *Fractals in Physics*, North-Holland (1986), 189.
- [4] Q. Y. Long et al., *Phil. Mag. A*, **67**, (1993),

(to be published).

- [5] B. H. Kaye, *A Random Walk Through Fractal Dimension*, VCP Publishers, (1989), 365—369.
- [6] M. Taya and R. J. Arsenault, *Metal Matrix Composites*, Pergamon Press, (1989), 80—101.
- [7] R. H. Dauskardt et al., *Acta Metall. Mater.*, **38-2** (1990), 143—169.
- [8] J. Feder, *Fractals*, Plenum, New York, (1988), 200—202.

表面结构研究的新进展

——第四届国际表面结构会议介绍

蒋 平

(复旦大学李政道物理学综合实验室;复旦大学应用表面物理国家重点实验室,上海 200433)

第四届国际表面结构会议(ICSOS-IV)于1993年8月16日至8月19日在上海举行。来自13个国家和地区的131位代表参加了会议,其中包括该领域的许多知名学者,如美国的S. Y. Tong(唐叔贤), M. A. V. Hove, C. S. Fadley和Y. R. Shen(沈元壤);德国的M. Henzler和K. Heinz;法国的G. L. Lay和日本的K. Takayanagi等。我国有51位代表参加会议,其中三名来自台湾,包括著名的郑天佐(T. T. Tsong)教授。ICSOS是系列性会议,每三年一次。第一届于1984年在美国加州伯克利市举行,第二届1987年在荷兰阿姆斯特丹市举行,第三届于1990年在美国威斯康星州密沃基市举行。本届会议是第一次在中国、也是第一次在亚洲举行的ICSOS。会议由复旦大学应用表面物理国家重点实验室主办。ICSOS-IV由华裔美籍学者唐叔贤任主席。我国物理学家谢希德教授任副主席兼组织委员会主席。

ICSOS旨在交流国际上表面和界面结构研究的最新成果,是这一领域国际上最高水平的专题性学术会议。ICSOS偏重于基础性课题,但也不排斥应用性研究。会议内容涉及确定表面与界面结构的实验和理论方法,新技术、新材料、新现象,表面的原子和电子结构对表面物

理、化学性质的影响,以及动态过程的计算机模拟等。按照传统ICSOS是以全体会议和张贴报告两种形式举行,不设分会场。但本届ICSOS的组委会决定从张贴报告中遴选出一部分,安排其作者在全体会议上对报告内容作短时间介绍。这一独特的形式使全体会议与张贴报告之间的联系更加密切。

半导体表面及其上的化学吸附历来是表面结构研究中令人瞩目的重要课题。本届会议一共安排了四场全体会议,几乎占总数的三分之一。长期争论不休并一直是研究热点的吸附Ag的Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 的结构在本届ICSOS上再度成为注意的焦点。历史上许多学者提出了各种不同的模型试图解释这种结构,其中较受重视的是日本的T. Takahashi等人于1988年提出的蜂窝链三体(HCT)模型。在上届ICSOS上,E. Vlieg等人的X射线驻波测量的数据支持这一模型。K. Takayanagi也根据高分辨率反射电镜的观察,认为银原子形成HCT结构,而硅原子则在缺顶层(missing-top layer)的硅晶格上排成蜂窝状层。在本届ICSOS上,美国依阿华州立大学的K. M. Ho(何启明)在他的邀请报告《用第一原理总能量计算确定表面结构》中介绍了用这种方法对吸

附 Au 或 Ag 的 $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面结构所作的理论研究,其理论计算结果符合 HCT 模型。此外,日本有好几个研究组在会上报道了同这一结构有关的实验研究。A. Ichimiya 等用反射式高能电子衍射 (RHEED) 方法得到的测量结果表明,最佳模型是 HCT,下面的硅原子呈三体 (Trimer) 排列。S. Ino 介绍了用 RHEED 结合新技术全反射角 X 射线谱 (TRAXS) 对 Sn 在吸附 Ag 的 $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面上外延生长所作的观测。K. Takayanagi 的邀请报告《表面研究的原位超高真空电子显微术和原位扫描隧道显微术 (STM)》,介绍了用高温 STM 观察由吸附金属所引起的 $\text{Si}(111)7 \times 7$ 表面的重构过程,报道了应用透射电子显微镜 (TEM) 甚至可以看到位于 $\text{Si}(111)$ 表面的单个铋原子的实验结果。T. Abukawa 等人报道了对 $\text{Ag}/\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 与 $\text{Ag}/\text{Ge}/\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构的比较性研究结果。后者是在先吸附 Ge 的 $\text{Si}(111)$ 表面上再吸附一个 Ag 单层而形成的。他们采用的方法是将俄歇电子衍射 (AED) 与新技术掠角入射背散射中能电子衍射 (GBMEED) 结合起来确定结构。AED 用于鉴定吸附原子并得出其结构信息;GBMEED 则用来探索吸附原子与衬底之间的结构关系,从而可以确定吸附原子的位置。从本届 ICSOS 来看,金属在 $\text{Si}(111)$ 面上吸附所形成的结构仍是目前表面结构研究的重点。

吸附半导体表面另一个长期没有定论而又很吸引人的研究课题是碱金属在 $\text{Si}(100)$ 表面的吸附位置。例如钾在 $\text{Si}(100)$ 表面究竟是处在支撑位还是空洞位,抑或形成其他结构,也是众说纷纭。在上届 ICSOS 上,法国的 P. Soukiassian 等人报道了用 STM 对钾吸附在 $\text{Si}(100)2 \times 1$ 表面形成的结构。当覆盖度低于半单层时,钾可能吸附在支撑位、空洞位与悬键位等各种位置,因而没有长程序;而当覆盖度达一单层时,作者倾向于钾吸附于空洞位,不过并未完全排除支撑位的可能。在本届 ICSOS 上, Soukiassian 介绍了最近得到的新成果。应用

与偏振有关的广延 X 射线吸收精细结构 (PEXAFS)。结合同步辐射芯态与价带光电子发射谱以及从头算全电子总能量理论计算,得出了一单层的碱金属 (Na, K, Cs) 原子吸附在 $\text{Si}(100)2 \times 1$ 表面并都处于空洞位的结果,而且实验与理论得到的碱金属、硅原子之间的距离也极相符。从而进一步澄清了上届 ICSOS 上的报告,朝着对这一类结构的正确认识又前进了一大步。本届会议上对上述两个典型课题的报告和讨论也生动地表明,尽管客观现象纷纭复杂,但随着研究的深入,终将逐步接近正确的认识,掌握事物的本质。

化合物半导体是元素半导体之外的另一类极重要的半导体材料,人们一直致力于使化合物半导体(特别是 GaAs)成为可与硅相匹敌的重要电子工业材料。然而由于其表面没有天然氧化层的钝化保护,它们的实际应用受到很大的限制。长期以来科技界一直期待着有效的钝化方法的发现。复旦大学王迅教授在本届会议上作了题为《硫钝化的 GaAs 表面的成分和结构》的邀请报告,介绍最近复旦大学应用表面物理国家重点实验室研究得到的一种迄今最为有效而又方便易行的硫钝化 GaAs 表面的方法,可以使表面复合速度下降好几个数量级。他们还用电子谱仪对硫钝化表面的成分、结构以及钝化层的形成机理进行了探讨。

金属及其表面的吸附是又一个重要的表面结构研究课题, ICSOS-IV 为之安排了两场全体会议。台湾物理研究院的郑天佐教授作了题为《Ir 表面动力学行为》的邀请报告。他们观察到吸附原子自扩散的两种机理,且在不同的表面所起的作用不同。在 (100) 表面为原子位移,在 (113) 与 1×2 重构的 (110) 表面为原子跳跃,而在 1×1 的 (110) 表面则两种机理都起作用。美国布鲁克海文实验室的 D. Gibbs 在其邀请报告《平坦和有台阶的 Pt 与 Au 表面的热相行为》中,介绍了用高分辨率 X 射线散射技术对低指数表面结构和相变的表征。在一定的温度范围内,表面会出现比面心立方 (111) 面原子排布密度更大的近似六角密集结构的重

构层。随着温度的变化,观察到一系列新的结构和相变,诸如公度-非公度、有序-无序、转动及粗糙化等。在高温,表面则分成高度台阶化的和完全无台阶的区域。美国加州圣荷塞 IBM 的 S. Chiang (姜秀兰)报道了用 STM 对氧在 W(110)表面吸附的几个有序相的观察,发现氧吸附于三度配位处,而在表面原胞内两个等价吸附位置之间的转移会导致稳定畴的形成。

为了准确地决定表面结构,在实验设备、数据采集和处理以及理论研究等方面不断改进原有的技术和创立新的技术,是研究人员为之不继奋斗的又一个方向。在本届 ICSOS 上,除去上面提到的 TRAXS 与 GBMEED 外,表面成像方面的新技术吸引了与会者的注意。长期卓有成效地从事光电子衍射研究,现在美国加州大学劳伦斯伯克利研究所工作的 C. S. Fadley,在他的邀请报告《光电子衍射与全息:若干新方向》中,介绍了新近从光电子衍射演变而来的光电子全息术,指出用这种新技术能直接得到发射中心近邻的三维象。美国劳伦斯利弗摩尔实验室的 J. G. Tobin,在题为《利用和能量有关的光电子衍射的表面结构成像》的邀请报告中,也报道了一种新方法,即将实验上得到的同能量有关的光电子衍射数据作傅里叶变换,以产生真实的表面合金像。这种技术能以原子分辨率得出表面原子的位置。以前没有弄清楚的结构用这种方法终于确定为表面合金而非覆层结构。台湾学者 C. M. Wei 介绍用多重能量相位叠加法对测得的 Kikuchi 图作傅里叶变换,也能以 1 Å 的高分辨率直接获得表面结构。他们已成功地得到铌单晶(100)与(111)表面的高质量三维原子像。

低能电子衍射 (LEED) 是应用最为广泛

的确定表面结构的技术。然而对于一些复杂的表面,由于包含太多的结构参数而使传统的 LEED 处理起来相当困难。劳伦斯伯克利研究所的 M. A. V. Hove 报告,根据最近由 Rous 与 Pendry 提出的张量 LEED 理论,他们发展了一种称之为自动化张量 LEED 的技术,可以同时确定超过 30 个的结构参数,从而能根据通常设备测得的 I-V 曲线,得出诸如 Pt(111)- 2×2 -NO, Re(0001)- $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ -R30°-6S, Rh(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -R30°-CO 以及 Rh(111)- 3×3 -C₆H₆ + 2CO 这样的复杂的表面结构。美国威斯康星大学密沃基分校的唐叔贤则在他的报告中比较了低能质子衍射 (LEPD) 与 LEED 之间的区别。由于质子散射因子中不存在强共振,多重散射的影响对质子来说要弱得多,从而使 LEPD 具有弹性散射弱而非弹性散射强的双重优点,成为表面结构研究中更为理想的工具。

表面结构研究是表面科学中最具基础性的学科,但近年来的发展却展现了过去无法想象的诱人的应用前景。例如扫描隧道显微术已不仅用于观察表面,而且可进一步用来随意操纵表面原子的位置。展望未来,也许会形成原子级表面材料设计、裁剪、修饰的加工技术而开创一个全新的时代。日本理化研究所表面与界面实验室的 M. Aono 在本届会议上所作的《原子工艺计划》的邀请报告介绍了这方面的最新进展和今后的发展预测,引起到会代表的浓厚兴趣。

第四届国际表面结构会议在我国召开,使我国的许多学者,特别是许多研究生和年轻的研究人员有机会参加,这对我国表面科学的研究和发展必将起巨大的推动和促进作用。

(上接第 172 页)

检修类课程,特别是学生能更加自觉和有效地进行自我塑造,相信物理专业的毕业生会越来越

越受到社会的青睐,并在国民经济的技术进步中作出辉煌的成绩。