

图7  $\text{Fe}_{50}(\text{SiC})_{50}$  粉体的晶粒尺寸( $d$ )和均方根应变( $\langle e^2 \rangle^{1/2}$ )与球磨时间的关系

的纳米材料和超细粉,并对其物性和正电子寿命谱与合金晶粒尺寸的关系进行了研究.

综上所述,研究机械合金化过程,无论在理论方面,还是在发展新材料方面,现已显示出其重要性和诱人的前景,但仍待开展深入研究.

[ 1 ] J. S. Benjamin, *Metall. Trans.*, **1**(1970),2943.  
 [ 2 ] J. S. Benjamin, *Mater. Sci. Forum*, **88**-90(1992), 1.  
 [ 3 ] T. Nakamura et al., *J. Mater. Sci. Lett.*, **8**(1989),

13.  
 [ 4 ] A. R. Yavari and P. J. Desre, *Mater. Sci. Eng.*, **A 134**(1991),1315.  
 [ 5 ] C. Suryanarayana and F. H. Froes, *J. Mater. Res.*, **5**(1990),1880.  
 [ 6 ] H. J. Fecht et al., *Metall. Trans.*, **21A**(1990),2333.  
 [ 7 ] E. Gaffet and M. Harmelin, *J. Less-Common Met.*, **157**(1990),201.  
 [ 8 ] T. D. Shen et al., *J. Non Cryst. Solids*, **150**(1992), 464.  
 [ 9 ] K. Y. Wang et al., *J. Mater. Sci. Lett.*, **11**(1992), 129.  
 [ 10 ] K. Y. Wang et al., *Scripta Metall. Mater.*, **25** (1991),2227.  
 [ 11 ] T. D. Shen et al., *J. Appl. Phys.*, **71**(1992),1967.  
 [ 12 ] K. Y. Wang et al., *J. Appl. Phys.*, **70**(1991),7158.  
 [ 13 ] W. F. Miao et al., *Scripta Metall. Mater.*, **26** (1992),287.  
 [ 14 ] T. D. Shen et al., *Mater. Sci. Eng.*, **A 151**(1992), 189.  
 [ 15 ] T. D. Shen et al., *J. Non Cryst. Solids*, **150**(1992), 468.  
 [ 16 ] T. D. Shen et al., *J. Mater. Sci. Lett.*, **11**(1992), 1576.  
 [ 17 ] E.景唐,自然科学进展,**1**(1991),13.  
 [ 18 ] K. Lu et al., *J. Appl. Phys.*, **69**(1991),522.

## 金属和半导体表面的 STM 研究

白春礼

(中国科学院化学研究所,北京 100080)

在过去的半个多世纪中,已有许多表面分析技术问世,它们在金属和半导体表面结构的研究中起着重要的作用.80年代发展起来的扫描隧道显微镜(STM)是又一种新型、先进的表面分析技术,它能在多种实验环境(真空、大气、溶液、低温等)下实时观察导体和半导体表面的实空间几何结构和电子结构,弥补了其他表面分析技术存在的某些不足,受到了表面科学界的极大重视.有关STM的基本原理,本刊已有多篇综述文章<sup>[1-4]</sup>,本文主要介绍STM在金属和半导体表面结构研究方面的一些实例.

### 一、金属表面

用低能电子衍射,离子、原子散射等方法已

经发现,金属表面的结构并不都与其体相晶格的原子堆积结构一致,Pt, Ir, Au等表面往往发生重构.吸附物在表面上除能形成各种结构的覆盖层外,与金属表面的相互作用,也可能使衬

底表面发生重构. 由于化学吸附表面的情况较复杂, 至今已研究确定的这类表面结构还很少. 在 STM 对清洁金属表面的观测实验中, 针尖和样品表面形成了最简单的隧道结. 用 STM 研究金属表面具有其独特的优点, 它不仅能实时观察金属表面的实空间结构, 而且通过比较具有不同气体覆盖度的金属表面 STM 图, 还可以研究化学吸附诱导金属表面重构的成核和生长等的微观机理. 通过控制样品温度, 研究金属表面的动力学行为已成为可能.

### 1. 清洁金属表面的几何结构

铂、铱、金等金属表面存在着各种类型的重构, 其中特别是(110)表面的  $1 \times 2$  重构受到了人们的重视. 现已提出了许多模型, 但不同的实验数据支持着不同的模型. STM 的观察结果不仅证实了失列(missing row)型  $(1 \times 2)$  结构, 并且还验证了从有序到无序的相转变过程. 对金属表面的首次 STM 观察是在 Au(110)表面进行的, Binnig<sup>[5]</sup>等用 STM 对 Au(110)表面进行了研究, 清楚地观察到了表面由一系列相互平行的山形结构组成(如图 1 所示), 它们沿  $[1 \bar{1}0]$  方向, 长达几十个 nm. 大多数“山”与“山”之间的距离为 0.8nm, 结果形成  $(1 \times 2)$  重构带.  $(1 \times 2)$  重构带又被台阶和  $(1 \times 3)$  重构畴

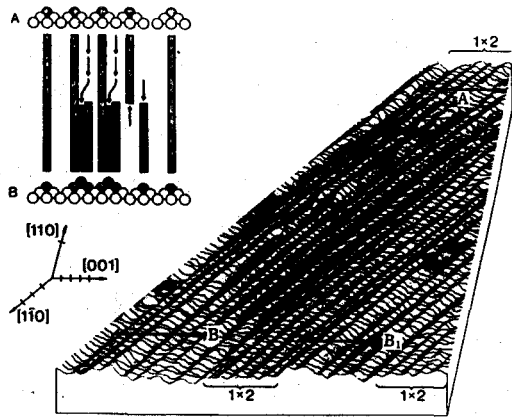


图1 Au(110)表面的 STM 图, 示出被台阶和  $1 \times 3$  重构畴分开的  $1 \times 2$  重构带, 坐标轴上的单位刻度为 0.5nm, 在 B 处的无序结构在  $B_1$  处重复出现

分开, 致使表面  $[001]$  方向比  $[1 \bar{1}0]$  方向无序. 在高分辨的图像中还能观察到高密度的  $(1 \times 3)$  重构畴以及  $(1 \times 4)$  重构畴向两个  $(1 \times 2)$  重构畴物理

转变. 根据实验结果, 研究者认为 Au(110)表面的  $(111)$  小面化是其重构的基本推动力, 并且支持  $(1 \times 2)$  重构的失列模型. 当样品温度升高时, STM 研究还发现  $(1 \times 2)$  结构经历了一个向衍射图中的类似  $(1 \times 1)$  体相的相转变过程, 低能电子衍射 (LEED) 及理论研究已证实这是一个二维的有序—无序转变. 在无序  $(1 \times 1)$  相中, 表层顶层原子与体相晶格位 (bulk lattice sites) 是匹配的, 即表面在晶格-气体的意义上是无序的<sup>[6]</sup>. Au(110)表面经过在相转变温度上下 10K 范围内的退火处理后, 虽然 STM 图显示出具有很小畴尺寸的  $(1 \times 2)$  重构仍存在, 但有半数的有序点在对应的 LEED 图中几乎都消失了. 这是因为平均畴尺寸是 20—40 Å, 远小于通常电子衍射的相干长度. 畴不仅被台阶隔开, 而且也被  $(1 \times 3)$  或  $(1 \times 4)$  类型的失列结构所分隔.

第一例关于密堆积金属表面原子级分辨率的 STM 研究是对 Au(111)面的观测. 在  $1 \times 1$  表面原子晶格图中, 原子起伏为 0.3 Å, 在 +1eV 和 -1eV 之间, 不同的样品偏压对于观测的起伏幅度没有影响. 对隧道电流和不同针尖-样品间距下的起伏幅度测量, 揭示了这些量随着对表面距离的增大而呈指数性衰减. 对于 2 Å 范围以上的针尖-表面的不同距离, 能分辨出表面起伏. 对于所观察到的原子起伏的物理解释仍在讨论中, 一般把这种现象归因于 Au(111)表面态的出现.

在外延蒸发沉积的 Au(111)薄膜表面的 STM 研究<sup>[7]</sup>中, 不仅在真空中, 而且在空气中也获得了原子级分辨率的 STM 图象(示于图 2). 另外一种获得原子级分辨率的金属表面是 Al(111)表面<sup>[8]</sup>.

在某些情况下, STM 能分辨出具有密堆积结构的金属表面的单个原子, 但通常只能观察到金属表面的台阶、平台等结构特征. 与半导体相比, 在金属表面的 STM 研究中, 较少获得原子级分辨的结果, 其原因可能与金属表面原子密度和自由电子密度较半导体大有关. 此外, 仪器本身的性能、扫描针尖和样品本身的状态也

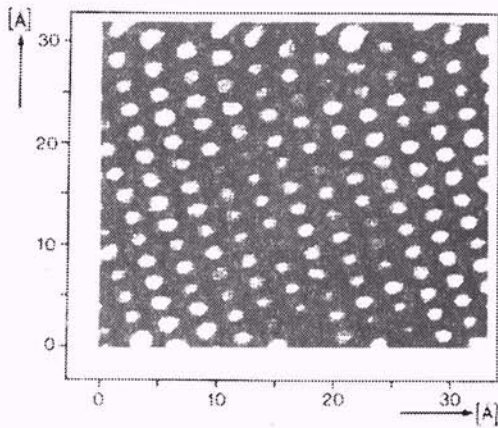


图2 在空气中获得的 Au(111)薄膜表面的 STM 形貌图

是不可忽略的因素。

在 STM 研究中,并不都是要求或希望达到原子级分辨率.对于表面纳米级(1—10nm)分辨率的 STM 研究,也有许多重要和有意义的.对金属表面,已有许多研究者做过粗糙度(roughness)的观测工作,例如,在室温和 90K 下凝聚的银膜在粗糙度上就有所不同,这可解释为由于限制扩散的聚集而引起的。

## 2. 吸附引起的表面重构

金属表面的重构,虽然不象半导体那样普遍,但对许多金属而言却是一种重要的表面现象.大多数 fcc 过渡金属的(110)表面及 5d fcc 过渡金属的(100)平面,如 Ir, Pt, Au 等,都具有趋向于重构的不稳定性.在所有情况下,某一表面的几何结构的稳定性会受到表面吸附质的很大影响.因此,吸附或脱附过程常伴随着表面的结构转变,即表面产生重构,或者已发生重构的清洁表面的重构消失.(1×2)和(1×3)失列重构的 Au(110)及(2×1)O 重构的 Ni(110)表面是被 STM 观察研究的第一类金属体系.此后许多对此类体系深入的 STM 研究揭示了吸附诱导的结构转变过程.O 与 Cu(110)的重构反应,已被包括 STM 在内的许多实验技术研究过.对这一体系的详细讨论可以显示出 STM 在原子水平上研究重构机理的优势。

氧吸附常常诱导金属表面发生复杂的重构,金属铜就是其中的一例.LEED 数据证明存

在 Cu(110)-(2×1)O 和 Cu(110)-C(6×2)O 等表面结构.但对这些表面原子排布的细节,近年才有较统一的认识,而 STM 的结果<sup>[9]</sup>起了重要作用。

图 3(a)是清洁 Cu(110)表面的 STM 形貌图.当在 100℃时,把 Cu(110)表面暴露在 1L (1L=1.33<sup>-4</sup>Pa·s)的氧气中,STM 观察发现沿着[001]方向形成的孤立 Cu-O-Cu 原子键和由 Cu-O-Cu 链构成的岛,如图 3(a)所示.这些岛在[001]方向为 10—20nm,在[1 $\bar{1}$ 0]方向为 1.5—2nm,说明这些岛优先在[001]方向生长.当把 Cu(110)表面暴露在 10L 的氧气中,表面大部分区域都覆盖上了(1×2)O 重构相,如图 3(c)所示.进一步把铜表面暴露到~10<sup>5</sup>L 的氧气中,还观察到表面 C(6×2)结构.STM 也观察到了 Cu-O-Cu 链在表面上的移动.这些事实表明:通过考察具有不同氧覆盖度的铜表面的 STM 图研究氧化学吸附诱导铜表面重构的成核和生长机理,得出了令人信服的结论. Cu(110)-(2×1)O 重构的形成是先在表面平台上成核,然后在表面上各向异性的生长 Cu-O-Cu 链和岛。

## 二、半导体表面

硅、锗是在技术上较容易获得清洁表面的单质半导体,也是被 STM 广为采用的研究对象.在硅的各种表面结构中,被 STM 研究得最深入也是最成功的例子是 Si(111)-7×7 结构.这也是使 STM 的发明者 Binnig 和 Rohrer 博士获得诺贝尔奖的一个重要工作。

早在 30 多年前就已知道,当样品在真空中被加热到大约 900℃时,清洁的 n-型或 p-型 Si(111)表面将出现 7×7 重构.低能电子衍射实验证明,这种重构晶胞的大小在平面的每个方向是 1×1 晶胞的七倍.7×7 表面和内部的成键性质不同,是一种非常有特性的典型表面.但 30 多年来,其表面的原子排列状态一直没有被很好地了解.虽然 Si(7×7)的表面结构问题并不能只从 STM 图像上得到解决,但 Binnig 和

Rohrer 对于 Si(7×7)单胞的“十二吸附原子”的最初观察却为现在逐渐被广泛接受的 DAS

(dimer-atom-stacking-fault)模型<sup>[10]</sup>提供了重要线索. Si(111)-7×7 表面现已成为检测超

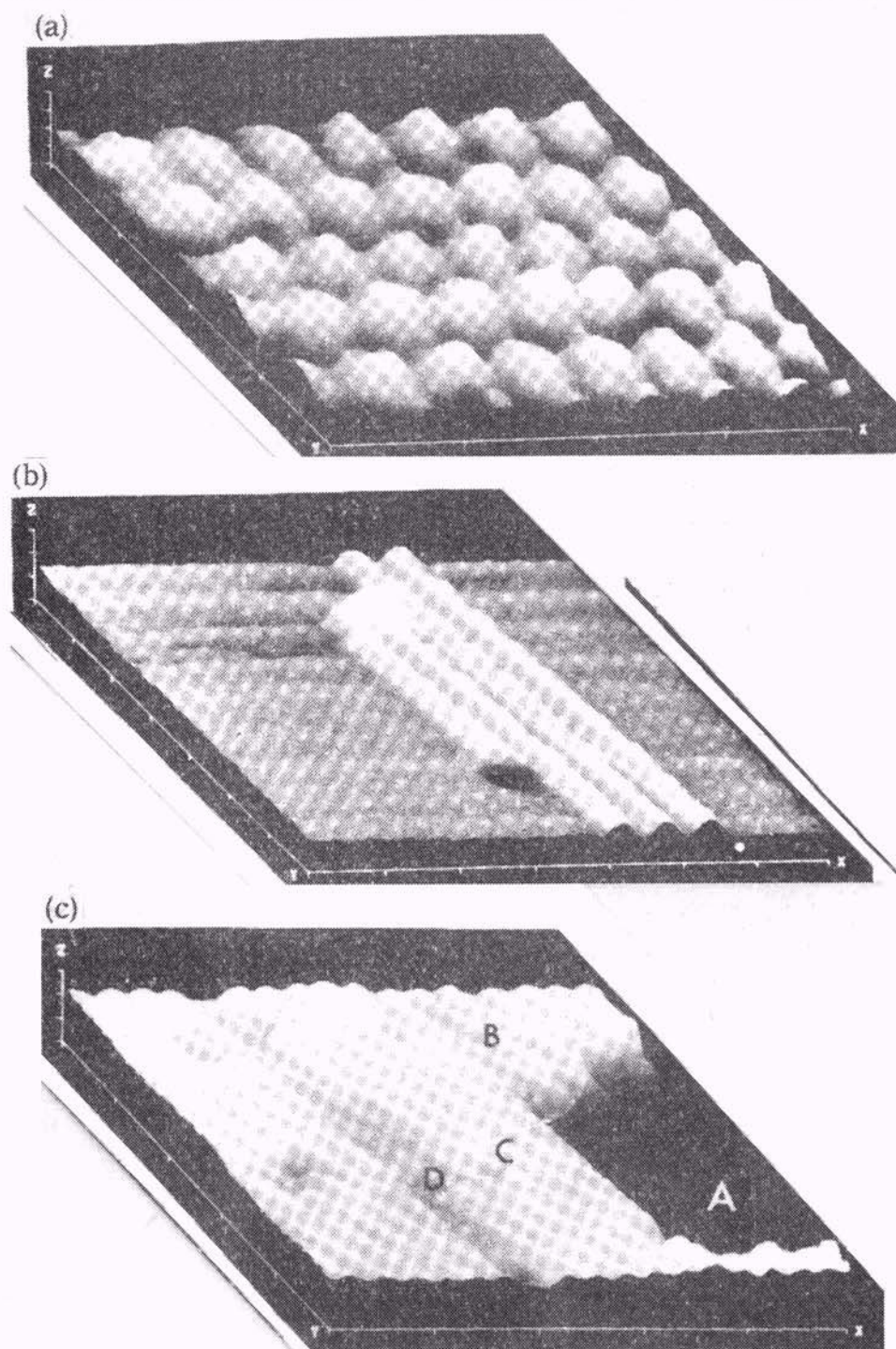


图3 (a)清洁 Cu(110)-(1×1)表面的 STM 图象(2×2nm<sup>2</sup>);(b)Cu(110)暴露氧~1L 后表面上形成的 Cu-O-Cu 排列的 STM 图象(7×7nm<sup>2</sup>);(c)暴露氧~10L 后表面形成的(2×1)O 结构的 STM 图象(10×10nm<sup>2</sup>)

高真空下工作的 STM 仪器性能的标准图像。

图 4 是用不同偏压得到的 STM 形貌象, 由于偏压决定了能够参与隧道效应的电子态, 因而得到的结果与样品偏压有关. 图 4(a) 是用负样品偏压得到的表面形貌图, 隧道效应来自于 Si(111)-7×7 表面占据的电子态, 而图 4(b) 是用正样品偏压得到的表面形貌图, 样品的未占据态参与隧道效应. 图中白色表示凸起的原子. 从图中可以清楚地看出表面单胞内共有十二个凸起的原子, 即所谓“吸附原子”. 这与 DAS 模型一致. 在单胞顶角空洞处, STM 图像显示出比吸附原子的高度低 2 Å.

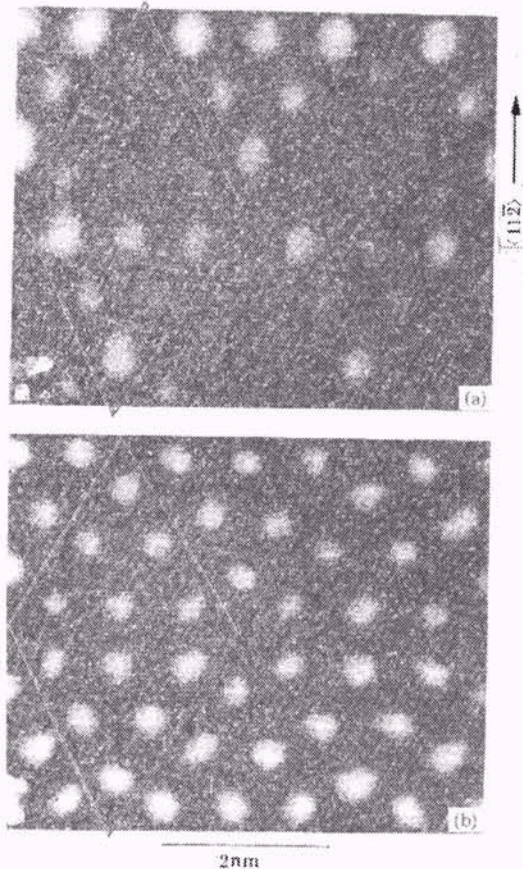


图 4 Si(111)-7×7 表面结构  
(a)负样品偏压;(b)较高的正样品偏压

Si(111)-7×7 表面的电子结构同其几何结构一样, 也是一个很有意义的研究课题. 如今, 已获得了有关这个问题的许多信息. 例如, 光电子谱和反光电子谱分别给出了占据态和未占

据态精确的能量信息, 但不足的是它至少也是  $10^{11}$  个原子的平均值. 而 STM 配合扫描隧道谱技术能实空间观察表面态的空间分布, 通过考查表面的 I/V 特性还能区分这些表面态的能量.

图 4(a) 中大多数隧道电流来自于十二个吸附原子的悬键态, 但在有堆积错位的亚单胞里的吸附原子比在没有堆积错位的亚单胞里的吸附原子对隧道电流的贡献更大, 在两个亚单胞里都是顶角吸附原子比中心吸附原子对隧道电流的贡献更大.

当偏压在 -0.6 至 -1.0 eV 时, 在获得的 Si(111)-7×7 表面图象中<sup>[11]</sup>, 在单胞里十二个吸附原子之间有六个高电流区, 它们来自于吸附原子下面那层原子的悬键. 当显微镜水平分辨率达到最高时, 在顶角空缺的中心还能观察到第七个高电流区. 首次观察到这种与吸附原子无关的悬键态可以得出 Si(111)-7×7 结构模型的重要结论, 即由这些悬键态反映出来的与单胞短对角线成镜面对称的高电流区, 意味着吸附原子下面的这层原子也具有镜面对称性, 并直接证实了其中的一个亚单胞里存在着堆积错位.

对于 Si(111)-2×1 的研究结果表明<sup>[12]</sup>: STM 图反映的不是 Si(111)-2×1 表面的几何结构, 而是表面的电子结构. 进一步考查不同偏压的 STM 图, 发现 STM 观察到的最大值和表面悬键一一对应. 由不同悬键构成的表面态一般具有不同的能量, 因此在不同样品偏压条件下就能观察到各种表面态.

利用隧道谱技术测量 Si(111)-2×1 表面的 I-V 特性以及 S(针尖和样品间距)和 V 的关系曲线, 确定了 -4eV—+4eV(相对于费米能级)整个能量范围内的表面态密度, 观察到了众所周知的 0.45eV 的表面能隙, 能隙内的表面态是由于表面无序或缺陷的存在而产生的, 也观察到了占据和未占据  $\pi$  键表面态能带结构和一个由导带临界点引起的共振能带. 已占能带 (0.8eV) 比未占能带 (1.0eV) 窄, 这和  $\pi$  键链模型的理论预测是一致的.

Si(001)表面,因其在技术上的重要性,在STM出现之前,人们已在理论上和实验上作过广泛的研究,在此基础上提出了许多有关表面结构的模型,这些模型大体可以分成三类,即二聚体模型,链模型和空位模型.但是,在过去的实验中,由于相邻于表面层的体内原子的扰动,以及实验上难以制备非常有序的表面,一直没有获得关于Si(001)表面几何结构的一致结论.最近,人们用STM在实空间观察了经退火清洁处理后的Si(001)表面,将所获得的实验STM图与根据模型用原子、电荷相叠加的方法得出的理论STM图比较说明:STM实验数据与二聚体模型相一致.离子散射实验、低能电子衍射实验以及理论能带结构和能量最小值计算结果也支持着二聚体模型<sup>[13]</sup>.故现在一般认为Si(001)表面是由二聚体组成的.

STM观察还发现,Si(001)表面的台阶诱导二聚体发生弯曲.在 $\langle 110 \rangle$ 方向的台阶边缘,二聚体产生扭曲.对于 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向的台阶,台阶边缘的原子有的参与二聚体的成键,有的不参与.由此人们认为:台阶同缺陷一样或者引起了二聚体的扭曲或者使二聚体的扭曲稳定,它们同是造成 $C(4\times 2)$ 和 $P(2\times 2)$ 畴的原因.当退火温度升高时,台阶密度增加,缺陷密度减少,表面粗糙化.

早在STM技术之前,人们已发现Si(001)- $(2\times 1)$ 表面在费米能级的2V之内有两个表面态.其中一个是硅-硅二聚体键,另一个是每个二聚体余下的两个悬键.能量最小值计算预测:二聚体的扭曲导致定域电子结构的变化,在扭曲的二聚体中较低的原子向较高的原子发生电荷转移.结果,上述的两个表面态可能要遭到破坏,产生一个充满的二聚体键态和一个空的悬键态. Hamers 等人<sup>[14]</sup>利用CITS(current imaging tunneling spectroscopy)技术直接观察到了这种充满的二聚体键态和空的悬键态.对于扭曲的二聚体,他们发现两个原子上有不同的电子结构.在负偏压产生最高隧道电流的原子在正偏压产生最低的隧道电流,反之亦然.这一事实直接证实了能量最小值计算的物理

预测结果.

另外,用LEED、俄歇谱(AES)和STM对用分子束外延法生长在Si(111)- $7\times 7$ 表面的锗膜的研究表明<sup>[15]</sup>:清洁Ge(111)面的超结构,如 $C(2\times 8)$ , $2\times 2$ , $C(4\times 2)$ 等与清洁处理过程中的退火温度有关.用氩离子轰击加退火清洁处理的Ge(001)表面主要由 $(2\times 1)$ 重构的二聚体组成,从STM图象中还清楚地观察到了由二聚体和二聚体缺陷构成的平台被单原子高或双原子高的台阶分开,台阶的高度取决于样品的截取方向.当沿着 $[1\bar{1}0]$ 方向截取,Ge(001)表面出现双原子台阶,当沿着 $[010]$ 方向截取,Ge(001)表面主要是单原子台阶.平台主要是 $(2\times 1)$ 重构.

锗-硅合金具有 $(5\times 5)$ 重构的低能电子衍射图样,这个图样与清洁Si(111)- $7\times 7$ 结构的衍射图样非常相似.因此,人们怀疑这两种表面之间可能存在某种关系. Becker 等人<sup>[16]</sup>在这方面做了细致的工作,获得了一些新的知识.他们对用分子束外延法在Si(111)表面生长几十个nm厚的锗膜进行处理,使其表面附近的锗-硅原子浓度近似相等,然后在650℃进行退火清洁处理,结果给出“ $5\times 5$ ”结构的低能电子衍射图样. Ge-Si(111)表面的STM图类似于Si(111)- $7\times 7$ 结构的STM图,都具有六边形的蜂窝结构,如图5所示.不同的是:(1)每个单胞里凸起的原子比Si(111)- $7\times 7$ 结构少一半,只有六个,如果将Si(111)- $7\times 7$ 结构单胞里的六个中心吸附原子去掉,那么就是Ge-Si(111)- $5\times 5$ 结构,为此他们按照Takayanagi关于Si(111)- $7\times 7$ 结构的DAS模型提出了类似的Ge-Si(111)- $5\times 5$ 结构的模型.(2)凸起的原子一高一低交替变化,变化的大小与锗、硅共价半径之差相吻合,这可以初步说明锗、硅交替排列在蜂窝心的周围.

如前所述,STM图反映的是表面局域态密度的形貌.就化合物半导体而言,由于不同原子的化学特性不一样,一个特定的波函数常常优先定域在特殊的原子或键上.因此,表面态的能量和分布既取决于表面原子的位置又取决于表

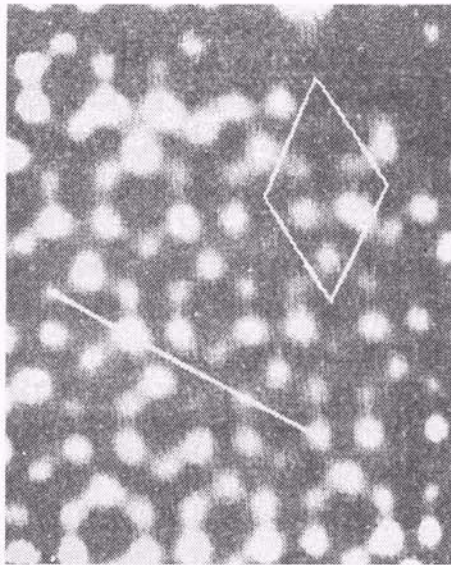


图5 Ge-Si(111)-5×5 重构表面的 STM 图

面原子的化学特性. 由于上述原因, 在某一特定偏压值获得的 STM 图仅仅反映了某一原子位置, 通过比较不同偏压的 STM 图, 就能确定两个不同的原子之间的水平距离  $\Delta$ . 为了确定原子之间的纵向位置, 常常将实验  $\Delta$  值与理论  $\Delta$  值相比较. 当电负性不同的原子之间发生电荷转移时, 伴随着原子纵向位置的移动, 由于原子之间的键长基本不变, 因此人们常常用扭曲角  $\omega$  来表示原子纵向位置的移动值. 理论上又可求出  $\Delta$  值与  $\omega$  值之间的关系. 这方面研究进展的一个实例是对 GaAs(110) 表面的研究.

Feenstra 等人<sup>[17]</sup>用 STM 研究了真空解理的 GaAs(110) 表面, 获得了原子级分辨的 STM 图. 实空间区分了两种化学特性不同的原子, 精确确定了表面砷原子和镓原子的位置. 理论预测占据态(负偏压)的 STM 图反映了砷原子的位置, 未占据态(正偏压)的 STM 图反映了镓原子的位置, 如图 6 所示. 砷原子和镓原子的水平距离(平均值)  $\bar{\Delta} = 0.21\text{nm}$ , 通过与理论  $\Delta$  值相比较, 可以确定扭曲角  $\omega$  大于  $23^\circ$ , 最有可能在  $29^\circ$  至  $31^\circ$  这一范围内.

薄膜器件的优劣与薄膜的生长机理有着密切的关系. 为了更好的理解生长机理, 详细研究初始表面结构非常必要. 砷富集的 GaAs(001) 表面在分子束外延生长砷化镓时最为重要,

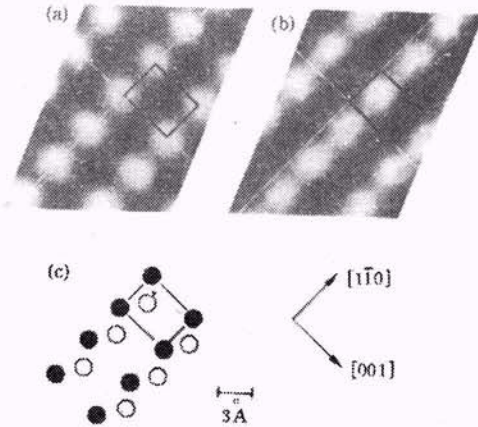


图6 在(a)1.9V和(b)-1.9V同时获取的GaAs(110)表面恒流STM像[原子的位置示于(c),空心圆代表As原子,实心圆代表Ga原子,长方框内为一个单胞,三张图中均相同]

Pashley 等人<sup>[18,19]</sup>用 STM 对这个表面也做了研究, 实空间观察到了表面同时存在  $(2 \times 4)$  和  $C(2 \times 8)$  结构. 这两种结构可能随时发生转化. 同时 STM 研究为表面台阶和岛结构的情况提供了新的信息, 台阶高为  $0.28\text{nm}$ , 对应于砷的平面间距. 岛的基本组成单元是  $(2 \times 4)$  单胞, 小岛主要由一个完整的  $(2 \times 4)$  单胞而不是以前理论预测的单个原子组成.

在用 STM 研究表面砷浓度和砷化镓重构关系时还发现, 当表面富集  $0.75$  单层的砷时, 产生  $C(4 \times 4)$  重构, 当砷量减少时, 依次产生  $2 \times 4$  [或  $C(2 \times 8)$ ],  $2 \times 6$  重构, 对于镓富集的砷化镓表面, 产生  $C(8 \times 2)$  重构.

二硫化钼、二硫化锡、二硫化钨、二硒化钨、二硒化钨以及其他过渡金属二硫族化合物等层状半导体, 由于表面与次表面仅有微弱的范德瓦耳斯力作用, 表面不存在悬键, 而且比较惰性, 所以可以在空气中用 STM 来观察表面的真实结构. 现已获得二硫化钼、二硫化锡、二硒化钨、二硒化钨、二硫化钨、二硒化钨等表面达原子级分辨的 STM 图. 对在金属二硫族化合物的表面电荷密度波的局域结构, 以及杂质、缺陷对电荷密度波的影响等方面的研究, STM 也发挥着其他技术难以替代的作用<sup>[20,21]</sup>.

金属在半导体表面上的吸附现象及超层的形成也是 STM 研究较多的一个方面, 如对第

三族过渡金属 Al, Ga, In 等在 Si(111) 面上的吸附及形成的超层结构, 碱金属 K, Na, Li 等在 Si 和 GaAs 表面的吸附都已做过系统的 STM 研究<sup>[22,23]</sup>.

- [1] 白春礼, 物理, **20**-3(1991), 132.  
[2] C. F. Quate, 物理, **16**-3(1987), 129.  
[3] 戴道宜, 物理, **14**-1(1985), 235.  
[4] 汪世才, 物理, **16**-6(1987), 321.  
[5] G. Binnig, et al., *Surf. Sci.*, **137**(1983), L379.  
[6] J. C. Campuzano et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 2684.  
[7] V. M. Mallmark et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 2879.  
[8] J. Wintterlin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **62**(1989), 59.  
[9] F. Besenbacher and K. Mortensen, *Europhys. News*, **21**(1991), 1.  
[10] K. Takayanagi et al., *J. Vac. Sci. Tech. A*, **3**(1985), 1502.  
[11] R. M. Tromp, *J. Phys: Condens. Matter*, **1**(1989), 10211.  
[12] R. M. Feenstra and J. A. Stroscio, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 2173.  
[13] J. A. Appelbaum, G. A. Baraff, and D. R. Hamann, *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 11.  
[14] R. J. Hamers, et al., *Surf. Sci.*, **181**(1987), 346.  
[15] J. A. Kubby et al., *Phys. Rev. B*, **36**(1987), 6079.  
[16] R. S. Becker et al., *Phys. Rev. B*, **32**(1985), 8455.  
[17] R. M. Feenstra et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1192.  
[18] M. D. Pashley and K. W. Haberen, *J. Vac. Sci. Tech. B*, **6**-4(1988), 1468.  
[19] M. D. Pashley et al., *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2176.  
[20] Xian Liang Wu and Charles M. Lieber, *Science*, **243**(1989), 1703.  
[21] Xian Liang Wu and Charles M. Lieber, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 1150.  
[22] T. Sakurai et al., *Prog. Surf. Sci.*, **33**(1990), 3.  
[23] C. Bai et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**(1992), L1117.

## 阵发、分形和粒子物理

朱镛雄

(华东师范大学物理系, 上海 200062)

高能碰撞中的阵发现象是现有的多重产生的动力学模型难以解释的. 利用多重分形理论可以为揭示碰撞的机制提供新的可能. 阵发现象的研究, 正在为粒子物理打开一个新的领域.

### Abstract

An unexpected dynamical fluctuation observed experimentally in high-energy collisions is not easy to explain in terms of conventional model of particle multiproduction. The method of multifractal description may provide a deeper insight into the dynamical mechanism of particle collision. The study of intermittency has opened up a new field about particle physics.

—

阵发现象存在于表现出某种不规则涨落行为的系统中, 典型的观测结果来自对混沌运动

和湍流的研究. 分形专指某种具有不光滑边界或表面的系统, 对分形的刻划起源于 70 年代创立的《分形几何学》. 阵发和分形涉及的是一大类用通常的统计方法不能处理的随机现象. 这些现象已经在自然界以及包括物理学、化学、生