

· 成果简介 ·

具有创新性的我国原子操纵研究

张志健

庞世瑾

(国家自然科学基金委员会,北京 100083) (中国科学院真空物理实验室,北京 100080)

[关键词] 原子操纵, 扫描隧道显微镜 (STM)

中国科学院北京真空物理实验室庞世瑾教授及其领导的研究小组开展的用超高真空扫描隧道显微镜 (STM) 进行原子操纵的研究项目, 在 1994 年取得了突破性的进展, 使我国的原子操纵研究处于国际前沿。

原子操纵是纳米科技的重要研究领域之一, 它的主要应用背景是纳米电子学。要研制纳米量子器件, 必须具备形成任意原子级和纳米级图案的能力。庞世瑾教授及其领导的研究集体在国家自然科学基金支持下, 用超高真空扫描隧道显微镜 (STM) 对原子操纵进行了系统研究, 成功地在 Si (111) 7×7 再构表面上实现了原子操纵, 受到学术界的高度重视。该成果在纳米电子器件、高密度信息存储、新材料组装等领域有广泛的应用背景。为此, 国家科委主任宋健向他们转达了国务院对他们所取得的成果的祝贺; 中国科学院周光召院长也给他们写信表示热烈祝贺; 诺贝尔奖获得者 G. Binnig 教授称之为世界级的成果; 另一位诺贝尔奖获得者 H. Rohrer 教授也祝贺他们得到了精美的实验结果。该成果被两院院士评选为 1994 年中国十大科技新闻之一。这项研究主要在以下三个方面有所创新:

(1) 发展了一种不同于国外流行方法 (如电压脉冲法) 的新的原子操纵技术。用扫描隧道显微镜进行原子操纵时, 主要是通过 STM 针尖与样品表面原子之间的相互作用来实现对原子的控制 (如从样品表面提取原子或向样品表面“植入”原子)。国外目前流行的方法是将电压脉冲加在针尖与样品之间产生强电场, 通过场的作用使原子发生转移, 从而实现原子操纵。如美国 IBM 公司以 Avouris 博士为首的研究小组的方法是: 首先将针尖移近到距样品表面约 3Å 的位置, 然后在针尖与样品之间加电压脉冲, 从而将 Si 原子从 Si (111) 7×7 再构表面提取出来。日本科学技术厅 Aono 博士领导的 Atomcraft Project 采用的方法是: 在正常扫描条件下 (偏压 $< 2.0\text{V}$, 隧道电流 $< 1.0\text{nA}$, 针尖与样品间距约为 5Å), 在针尖与样品之间附加上一个 $5\text{—}6\text{V}$ 的大电压脉冲, 也在 Si (111) 7×7 再构表面上实现了原子操纵。从目前的情况看, 用电压脉冲法进行原子操纵的重复性不够稳定, 成功率一般只有 $20\%\text{—}30\%$, 而且是单原子操纵, 对形成一定的原子结构的效率较低。为了将来在器件上的应用, 在原子操纵研究中, 需要解决操纵成功率低和速度慢这两个问题。庞世瑾教授及其领导的研究小组发展了一种新的原子操纵方法: 在正常扫描偏压条件下 ($< 2.0\text{V}$), 通过提高隧道电流, 在室温下, 在 Si (111) 7×7 表面实现了原子操纵。它既可进行单原子操纵, 如沿表面某一特定方向

本文于 1995 年 5 月 22 日收到。

进行快速扫描,又可对原子群体进行操纵,从而提高了操纵速率,可快速地将原子从样品表面上提出而形成特定的原子或纳米结构。通过对作用时间与操纵效果的研究发现,当作用时间 $<5.0\text{ms}$ 时,成功率只有百分之几,而当作用时间 $\geq 100\text{ms}$ 时,对原子操纵的成功率趋于百分之百。因此,在进行原子群体操纵时,通过控制操纵时间,可提高原子操纵的成功率。

(2) 在 Si (111) 7×7 再构表面上,首次沿特定晶格一维方向整齐地移走一个 7×7 单胞序列,形成具有原子级平直边界的规则结构,其宽度等于一个 7×7 单胞的大小 (23.3 \AA),这是在 Si (111) 7×7 再构表面可能得到的最小的稳定结构。他们在进行原子群体操纵研究过程中发现,当操纵沿样品表面任意方向进行时,所得到的原子结构不是一个稳定结果,边界比较粗糙。在 Si (111) 7×7 再构表面上,总存在一些台阶和畴界 (domain boundary) 等表面缺陷,它们都沿 Si (111) 7×7 再构表面的基矢方向 (即 $[\bar{1}10]$ 、 $[\bar{1}01]$ 、 $[0\bar{1}1]$) 排列,这些缺陷是在再构过程中自然形成的,是稳定结构。根据这一构想,当操纵沿样品表面的某一基矢方向 (如 $[\bar{1}10]$) 进行时,则得到了一种规则的原子结构,它是由 STM 针尖将一个 7×7 单胞序列整齐移走而形成的,具有原子级平直边界,其宽度恰好等于一个 7×7 单胞的宽度在该基矢方向上投影的大小 (23.3 \AA),而且是一种稳定结构。通过对这种规则结构形成的研究发现,它是以单原子操纵为过程的,即在快速扫描过程中,STM 针尖将 Si 原子从 Si (111) 7×7 再构表面上逐个提出而形成的,理论分析结果也证实了这一结论。

(3) 只从样品表面提出原子,而没有不需要的原子从针尖落到样品表面上,这对将来研制新型纳米量子器件具有重要意义。在进行原子操纵的过程中,从样品表面上提出的原子通常都吸附在针尖表面,并沿其表面进行迁徙。当针尖的最前端存在被提取出来的样品原子时,这些原子有可能在一定条件下回落到样品表面,这种现象对将来研制新型纳米器件是不希望出现的。为此,该课题组发展了一种控制针尖原子回落的方法,使在进行原子操纵时只从样品表面提出原子,而没有不需要的原子从针尖落到样品表面上,并用这一方法在 Si(111) 7×7 再构表面形成了规则图案结构。在这一方法的基础上,其他各种复杂形状图案可以通过软件来实现。

在一年多的时间里,庞世瑾教授及其小组对用超高真空扫描隧道显微镜进行原子操纵做了系统的研究,获得了丰富的实验结果并作了相应的理论分析。新的原子操纵方法、沿表面基矢方向操纵得到的稳定规则结构以及实现“只提不植”方法等成果,构成了具有创新性的中国原子操纵与纳米加工体系,使我国在这一研究领域处于国际前列,对新兴的纳米科技的发展作出了重大贡献,对纳米电子学、新型材料组装等具有重要意义。

STUDY OF ATOMIC MANIPULATION WITH DISTINCTIVE CHINESE FEATURES

Zhang Zhijiam

(NSFC, Beijing 100083)

Pang Shijin

(Beijing Laboratory of Vacuum Physics, CAS, Beijing 100080)

Key words Atomic manipulation, scanning tunneling microscope (STM)