

## 異種原子位置交換型水平原子操作の制御条件と機構の解明

### Mechanism and conditions on the atomic-interchange lateral Manipulation

森田 清三 (Morita Seizo)

大阪大学・大学院工学研究科・教授



#### 研究の概要

絶縁体も扱える原子間力顕微鏡(AFM)で、表面に埋め込まれている異種原子を識別して、隣接する原子の位置と室温で交換する新しい原子操作の方法(異種原子位置交換型水平原子操作)の物理的現象を明らかにし、新規な機能を持つナノ材料やナノデバイスを室温で作成する指針を得る。

研究分野: 複合新領域

科研費の分科・細目: ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード: (G)ナノプローブ・(E)ナノ構造物性・原子間力顕微鏡・水平原子操作・交換型原子操作・フォーススペクトロスコピー・原子識別・原子埋め込み文字

#### 1. 研究開始当初の背景・動機

(1)究極のナノテクノロジーといえる原子操作は極低温で行われるのが常識であったが、我々は原子間力顕微鏡(AFM)を用いれば、室温でも原子操作を行えることを発見し、原子埋め込み文字作成に成功した。  
(2)実験では、表面に埋め込まれている異種原子を隣接する原子の位置と室温で交換する新しい原子操作の方法を発見して用いた。  
(3)原理的には絶縁体への応用も可能で、様々な分野への応用が期待できるが、その現象に関しては未だ殆どわかっていない。

#### 2. 研究の目的

絶縁体も扱える AFM による異種原子位置交換型水平原子操作に関して、(1)精密な力学的原子操作方法の開発、(2)力学的原子操作現象の機構解明、(3)精密なフォーススペクトロスコピー測定法の開発、(4)AFM による力学的元素識別法の開発などを行い、(5)表面に埋め込まれた複数の元素で設計通りの複素ナノ構造体を構築する方法の基盤確立を目的とする。

#### 3. 研究の方法

(1)AFM テコの探針先端と試料表面の相互作用によるテコの共振周波数の変化(周波数シフト)や熱ドリフトを、超高真空中で正確に測定することにより、(2)個々の原子間の相互作用の強さを精密に制御して、(3)原子像の凹凸差測定、(4)個々の原子のフォーススペクトロスコピー測定・元素識別、(5)原子操作・組立を精密に行う。主な購入設備は、デジタル制御・測定回路など。

#### 4. これまでの成果

(1)AFM 元素識別像による原子種の相対識別に、「様々な2元素系」だけでなく、「様々な表面構造」で成功した。  
(2)室温の熱ドリフトを補正して、原子上で再現性良くフォーススペクトロスコピーを行い、高精度なフォースカーブは、元素識別像による原子種の相対識別よりも優れた元素識別法で、個々の原子の短距離引力(共有結合力)の最大値の比較により元素の混在比を変えなくても原子種を決定できることを見出した。  
(3)交換型水平原子操作は、「様々な2元素系」だけでなく、「様々な表面構造」でも起き、特に、IV族原子とIII族のIn原子やV族のSb原子との組み合わせでも起き、半導体では普遍的現象であることを明らかにした。  
(4)絶縁体のKCl(100)表面への垂直押し込みを用いた原子レベルの垂直操作や擬似接触操作による点欠陥の原子レベルの水平操作など絶縁体での垂直原子操作や水平原子操作の可能性を初めて示した。  
(5)単純な単元素半導体Si(111)-(7×7)で、Si アドアトム(原子)の空孔への水平原子操作の機構解明を行った。水平原子操作が起こる最小引力やポテンシャルは共有結合力や共有結合ポテンシャルの最大値よりも非常に小さいことや原子操作の様々な移動過程を発見した。さらに、フォースカーブのシミュレーションなどで、水平原子操作の機構を理論的に解明した。

(6)個々の原子の共有結合力最大値の比は、凹凸に依存しない、探針に依存しない、周辺原子との化学結合効果に影響されない、原子分解能を有する、非破壊なSi半導体系の新元素識別法になる事を明らかにした。

(7)複雑な「3元素系」半導体では、元素識別像の凹凸差による原子種の区別は不可能であるが、個々の原子の精密なフォースカーブ測定による共有結合力最大値の比を用いれば、多元素の混在比を変えなくても原子種を識別できることを見出した。

(8)テコの探針先端原子と試料表面原子が交換する異種原子交換型「垂直」原子操作の存在をSnとSi原子の混在系で実験的に証明した。AFM探針の29%では交換型垂直原子操作を起こし、しかも、探針先端と試料表面で(a)SiとSn原子を交互に入れ替える探針、(b)Sn原子のみを連続的に試料表面に埋め込む探針、(c)Si原子のみを連続的に試料表面に埋め込む探針の3種類の探針が存在することを発見した。

(9)Sn/Si(111)-( $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ )にSi原子のみを連続的に埋め込む交換型垂直原子操作探針を利用して、Sn原子を順番にSi原子と置換して、直接埋め込みにより、短時間で原子埋め込み文字を作成する方法を開発した。また、最近接のSn原子数を変えることにより中心のSi原子のフォースカーブを人工的に変化させることに成功した。この手法は、特定の原子の周辺原子種効果を、原子操作と組み合わせた個々の原子のフォーススペクトロスコープで解明する新しい分析手法になる可能性がある。

(10)アトム・トラッキングによるフィード・フォワード技術を用いて室温における熱ドリフトを実時間補償することによって、AFMを用いた「周波数シフト・マッピングによる元素同定法」を開発した。

(11)絶縁体KCl(100)表面の擬似接触領域で点欠陥の原子分解能水平操作を実現して、絶縁体表面での完全に制御された原子分解能の水平操作は半導体系に比べて非常に困難であることとその原因を明らかにした。

(12)(Ca,Sr)F<sub>2</sub>/Si(111)のCa<sup>2+</sup>とSr<sup>2+</sup>の陽イオン混在絶縁体表面でNC-AFMによる原子凹凸像の凹凸差により「混在陽イオン元素の識別」に成功した。

##### 5. これまでの進捗状況と今後の計画

(1)多くの新しい知見を研究推進中に得ると同時に、(2)多くの問題点も発見したが、その解決方法・見通しを示すことができ、研究は順調に進捗している。(3)今後は原子操作の機構解明だけでなく、(4)絶縁体表面での元素識別と原子操作の研究や、(5)多元素系ナノ構造体組み立てへ挑戦する。

##### 6. これまでの発表論文等

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

1. “How to Move an Atom”, O.Custance and **S.Morita**, Science (Perspectives), Vol.319, Issue 5866, pp.1051-1052 (2008).
  2. “Dynamic force spectroscopy using cantilever higher flexural modes”, Y.Sugimoto, S.Innami, M.Abe, O.Custance and **S.Morita**, Appl.Phys.Lett. Vol.91, Issue 9, pp.093120-1~093120-3 (2007).
  3. “Evidence of subsurface oxygen vacancy ordering on reduced CeO<sub>2</sub>(111)”, S.Torbrügge, M.Reichling, A.Ishiyama, **S.Morita** and O.Custance, Phys.Rev.Lett. Vol.99, pp.056101-1~056101-4 (2007).
  4. “Drift-compensated data acquisition performed at room temperature with frequency modulation atomic force microscopy”, M.Abe, Y.Sugimoto, T.Namikawa, K.Morita, N.Oyabu, and **S.Morita**, Appl.Phys.Lett. Vol.90, Issue 20, pp.203103-1~203103-3 (2007).
  5. “Mechanism for room-temperature single-atom lateral manipulations on semiconductors using dynamic force microscopy”, Y.Sugimoto, P.Jelinek, P.Pou, M.Abe, **S.Morita**, R.Pérez, and O.Custance, Phys.Rev.Lett., Vol.98, pp.106104-1~4 (2007)
  6. “Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy”, Y.Sugimoto, P.Pou, M.Abe, P.Jelinek, R.Pérez, **S.Morita** and O.Custance, Nature (Letter), Vol.446, Issue 7131, pp.64–67 (2007)
  7. “Japan AFM roadmaps 2006”, **S.Morita**, H.Yamada and T.Ando, Nanotechnology, Vol.18, pp.084001-1~084001-10 (2007)
  8. “Real topography, atomic relaxations, and short-range chemical interactions in atomic force microscopy: The case of the  $\alpha$ -Sn/Si(111)-( $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ ) R30° surface”, Y.Sugimoto, P.Pou, O.Custance, P.Jelinek, **S.Morita**, R.Pérez and M.Abe, Phys.Rev.B, Vol.73, No.20, pp.205329-1~9 (2006)
  9. “Single Atomic Contact Adhesion and Dissipation in Dynamic Force Microscopy”, N.Oyabu, P.Pou, Y.Sugimoto, P.Jelinek, M.Abe, **S.Morita**, R.Pérez, and O.Custance, Phys.Rev.Lett. Vol.96, No.10, pp.106101-1~4 (2006)
  10. “Room-temperature reproducible spatial force spectroscopy using atom-tracking technique”, M.Abe, Y.Sugimoto, O.Custance, and **S.Morita**, Appl.Phys.Lett. Vol.87, Issue 17, pp.173503-1~3 (2005)
- その他 13件 (英語発表論文)  
ホームページ等  
<http://www.afm.eei.eng.osaka-u.ac.jp/>