

杉本 宜昭

大阪大学 大学院工学研究科 准教授



原子間力顕微鏡による 個々の原子の同定と操作

原子一つひとつからナノデバイスを創製する技術の確立を目指して

研究の背景

超LSIに代表される半導体デバイスが、現代の高度なエレクトロニクス文明を支えている。微細加工技術により、電子素子は年々微細化しており、ナノメートルのサイズに迫っている。このような微細化によって、例えばトランジスターでは、チャンネル中に含まれるドーパントの分布の偏りがデバイスの特性に影響を与えるまでになっている。また、太陽電池をはじめとする、様々な機能材料において、添加元素、格子欠陥などの原子レベルでの配列が機能に深く影響を及ぼしていることが知られている。

そのような背景において、電子デバイスや機能材料を原子レベルで評価・加工する技術が必要とされている。そこで、原子間力顕微鏡(AFM)をはじめとする走査型プローブ顕微鏡が、原子レベルの分析装置として期待されている。AFMは、鋭い探針を観察対象の表面に接近させ、探針先端の原子と表面の原子との間に働く相互作用力を測定することによって、表面の個々の原子を観察したり、分析したりすることができる顕微鏡である。AFMは絶縁体を含む様々な表面を原子分解能観察できるなど応用範囲が広く、

また走査型トンネル顕微鏡とも複合化でき[1]、現在も発展が著しい。

研究の成果

受賞者は、AFMを用いて半導体表面の個々の原子を同定する方法を提案し、そして室温環境下で表面の異種原子の配列を自由に組み替える方法を見出した。また、シリコン表面の上に様々な金属ナノクラスターを設計通りに組み立てることに成功している。

1. 個々の原子の元素同定

探針先端の原子と表面の原子との間に化学結合を形成させ、その力を精密に測定することによって、表面の元素を同定する手法を見出した。例えば、図1(a)に示すように、Si原子とSn原子とで、測定される化学結合力の最大引力の大きさが異なる。ただし、その大きさは探針先端の構造や組成によって、様々に変わる。そこで、同じ探針を用いて2種類の元素を比較すると、化学結合力の最大引力の比が探針に依らない不変量になることを発見した。例えばSiとSnの間の比は77%であった。この性質を

利用することで、表面の個々の原子の元素同定に初めて成功した[2]。そして、半導体素子で重要なSiやInなどの元素に対して、この元素同定法が広く適用できることを実験的に確かめた。図1(b)にSi, Sn, Pbの三元素を同定した例を示す。異種元素が混在した表面を観察する場合、表面の原子は互いに結合し元素としての性質が覆い隠されるという理由、また探針先端の構造が不明である等の理由により、単一原子の元素同定は困難であるとされてきたが、探針を近づけて強制的に化学結合を生じさせる本手法によって、半導体表面の不純物やドーパントを原子レベルで同定する道が切り拓かれた。

2. 室温原子操作による半導体表面の ナノパターンニング

IBMで初めて原子操作が発表されて以来[3]、原子操作は極低温環境下で行うのが常識とされてきた。表面の上に吸着した原子は熱エネルギーによって、表面から脱離したり、表面上を動き回ったりするからである。そのような背景の中、受賞者は、室温での原子操作を可能にする方法を見出した。これは、熱力学的に安定である表面に埋め込まれた原子を、原子交換によって動かす方法で、これにより様々な半導体表面の原子の配列を変えることができる[4]。Ge原子とSn原子が混在した表面において、隣り合うGe原子とSn原子の位置を探針によって、120回以上、水平方向に交換し、「Sn」という原子文字を描いた例を図2(a)に示す。これにより、室温でも精度の高い原子操作が可能であることが初めて実証された。その後、探針先端の原子と表面の原子とを垂直方向に交換する方法を見出し、より高速で表面原子の配列を組み替えることができるように

図1 (a) SiとSn原子上で測定した化学結合力
(b) 化学結合力の比によるSi, Sn, Pbの元素同定の結果を示すAFM像

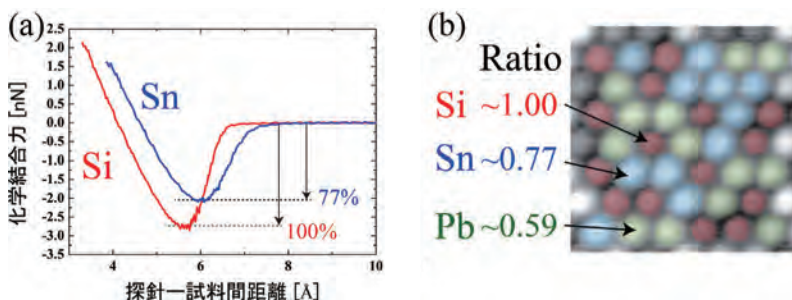
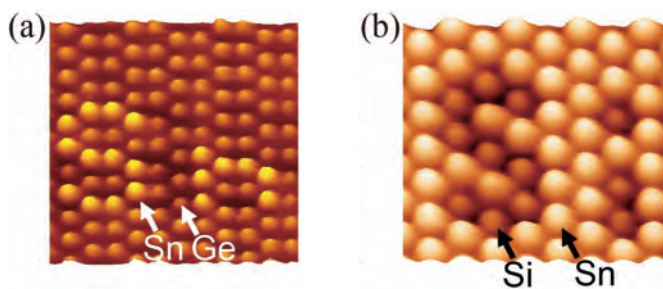


図2 (a) Ge基板に埋め込まれたSn原子を用いて描いた原子文字のAFM像。
(b) Sn表面に埋め込まれたSi原子を用いて描いた原子文字のAFM像。
それぞれ水平方向、垂直方向の原子交換によって作製された。



なった[5]。図2(b)にこの手法で描いた実験例を示す。また、室温原子操作の機構も研究し、探針先端との化学的な相互作用がトリガーになって、熱エネルギーによって、原子が移動するという機構を明らかにした[6]。受賞者の実験により、半導体表面のドーパントを原子レベルの精度で自由に配列する道が切り拓かれた。

3. 室温原子操作による

ナノクラスターの創製

受賞者は、最近、原子操作の技術をさらに発展させ、3次元的な構造を持つナノクラスターを組み立てることに成功している[7]。これは、表面に吸着した個々の原子をSi表面のナノ空間に閉じ込めることによって可能になった。図3に、原子一つひとつから、組み立てた金のナノクラスター(Au₁—Au₁₂)を示す。この手法によりSi, Sn, Pb, Agにおいても組成をコントロールしてナノクラスターを組み立てることができた。少数の原子から構成されるナノクラスターは、特異な性質を持つことが知られているが、本手法により、原子数や組成を決定したナノクラスターを組み立て、その性質が組成によって、どのように変わるのかを、実際に評価できる。触

媒や単一電子デバイスの分野で、新奇な機能を持つナノデバイス・ナノ材料が創製されることが今後期待される。

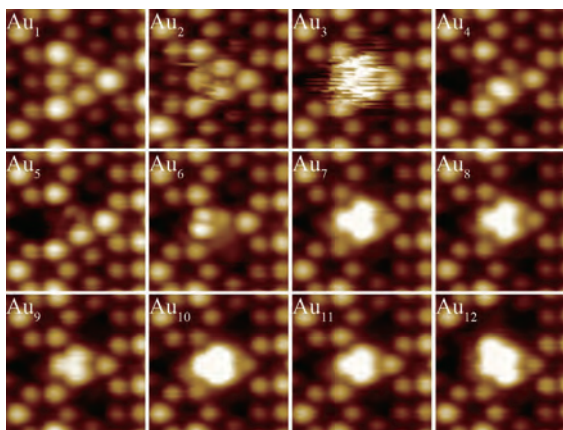
将来の展望

極低温環境下における原子操作による美しいナノサイエンスの研究は、現在でも注目を集めている。一方、我々は、より応用に近い室温環境下での原子操作の研究を継続して行っている。熱エネルギーによる原子の気まぐれな動きにより、室温における原子

操作は、原子移動が確率的となる。我々は、理論計算との比較により、室温原子操作は熱エネルギーの助けを借りているという結論に至っている。そのような、ファジーな原子操作のさらなる理解が、これからも重要であると考えられる。さらに、原子操作によって、原子の個数と組成を予め設計した通りにナノ構造を創製することができるようになったことは、工学的には大変重要である。ナノ構造の電子的、化学的性質が、サイズや組成によって、どのように変化するかを詳細に調べるなどすれば、ユニークな性質を持つ単電子デバイス、ナノ磁石、ナノ触媒など、多くの応用が期待できる。実際に、現在、原子を一つひとつ動かして組み立てた、いつかのナノ構造がスイッチ動作することを見出しており[8]、単一原子からのナノデバイスの作製は、ますます重要な局面にある。近い将来、新しい動作原理に基づくデバイスを提案できるかどうか、我々の腕の見せ所である。

本研究は、大阪大学において実施したものであり、学生や国内外の多くの研究者との共同の成果である。改めて関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

図3 室温原子操作によって作製された金のナノクラスター



References(参考文献)

- [1] Y. Sugimoto, M. Ondracek, M. Abe, P. Pou, S. Morita, R. Perez, F. Flores, and P. Jelinek, 'Quantum degeneracy in atomic point contacts revealed by chemical force and conductance' Phys. Rev. Lett. 111, 106803(2013).
- [2] Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Perez, S. Morita, and O. Custance, 'Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy' Nature 446, 64(2007).
- [3] D.M. Eigler and E.K. Schweizer, 'Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope' Nature 344, 524(1990).
- [4] Y. Sugimoto, M. Abe, S. Hirayama, N. Oyabu, O. Custance, and S. Morita, 'Atom inlays performed at room temperature using atomic force microscopy' Nat. Mat. 4, 156(2005).
- [5] Y. Sugimoto, P. Pou, O. Custance, P. Jelinek, M. Abe, R. Perez, and S. Morita, 'Complex patterning by vertical interchange atom manipulation using atomic force microscopy' Science 322, 413(2008).
- [6] Y. Sugimoto, A. Yurtsever, M. Abe, S. Morita, M. Ondracek, P. Pou, R. Perez, and P. Jelinek, 'Role of Tip Chemical Reactivity on Atom Manipulation Process in Dynamic Force Microscopy' ACS Nano 7, 7370(2013).
- [7] Y. Sugimoto, A. Yurtsever, N. Hirayama, M. Abe, and S. Morita, 'Mechanical gate control for atom-by-atom cluster assembly with scanning probe microscopy' Nat. Commun. 5, 4360(2014).
- [8] E. Inami, I. Hamada, K. Ueda, M. Abe, S. Morita, and Y. Sugimoto, 'Room-temperature concerted switch made of a binary atom cluster' Nat. Commun. 6(2015)accepted.