

平成22年4月23日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19053006

研究課題名（和文） 表面機能元素の制御と原子構造解析

研究課題名（英文） Control of Surface Atom Species and Analysis of Atomic Structure

研究代表者

森田 清三 (MORITA SEIZO)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50091757

研究代表者の専門分野：走査型プローブ顕微鏡

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：原子間力顕微鏡、表面機能元素、元素識別、原子構造解析、フォース・スペクトロスコーピー、原子操作、AFM/STM 同時測定、局所的接触電位差(LCPD)

1. 研究計画の概要

機能元素析出を人工的に制御・作成し、原子レベルでの物性評価を行うことで、新研究分野の開拓を行う。具体的には、我々の独自技術である原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた交換型原子操作によって、特定の原子を一箇所に集めて人工的に機能元素のナノ析出状態を作成する。さらに、アトムトラッキング法を用いた高精度・高感度なフォース・スペクトロスコーピーにより特定位置のドーパント（機能元素）の結合エネルギーや結合距離や化学結合効果の情報を抽出する。また、共通試料におけるドーパント操作技術を確立させ、表面に析出したナノ機能元素の物理を明らかにする。

2. 研究の進捗状況

- (1)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補償することによって、原子間力顕微鏡 (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。それにより、(Pb, Sn)/Si (111)-(√3×√3) 表面の 3 元素を同定できることを示した。
- (2)Si (111)-(7×7) 表面での Si アドアトムの空孔への水平原子操作を探針高さ一定モードで行うことによって、室温における原子操作が確率的に起こることを実証した。
- (3)TiO₂ (110) 清浄表面にカリウム (K) 原子を蒸着して、カリウム (K) 原子を原子分解能で原子間力顕微鏡観察することに成功した。
- (4)金属を蒸着した導電性のテコを使って Si (111)7×7、TiO₂ (110)、Ge (111)-c (2×8)、

GaAs (110) 清浄表面で AFM 周波数シフト像と STM トンネル電流像の原子分解能の同時測定に成功した。

(5)フォース・マッピング法を (Si, Pb, Sn)/Si (111)-(√3×√3) 表面の原子識別実験に適用し、フォース・マッピングで混在した Si 原子と Pb 原子と Sn 原子の 3 元素を識別することに成功した。また、この手法を発展させて、混在した原子の識別を簡単に高速に行える方法の開発に成功した。

(6)アトム・トラッキングのフィードフォワードでドリフトを補正して、正に帯電した探針と負に帯電した探針を用いて、低温で金属酸化物 TiO₂ (110) 清浄表面のブリッジ酸素上、Ti 原子上、OH 基上で化学結合力の探針-試料表面間距離依存性の測定に成功した。

(7)ケルビンプローブ力顕微鏡 (KPFM) による局所的接触電位差 (LCPD) の機構が、探針-試料表面間相互作用力による局所的分極に伴う電子状態の変化である事を実験と第 1 原理計算で明らかにした。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

(1)アトムトラッキング法を用いたフィード・バックによる熱ドリフト補正だけでなく、フィード・フォワードによる「実時間」熱ドリフト補正の新技術も開発して、計画時を超えた高精度・高感度なフォース・スペクトロスコーピーを実現した。

(2)フォース・カーブによるフォース・スペクトロスコーピーだけでなく、フォース・マッ

ピングによる新手法を開発して、「実時間」元素識別を可能にした。

(3) 交換型原子操作による「基板に埋め込んだ」ナノ析出状態（ナノ構造体）の構築だけでなく、室温で動き回る原子をナノ空間内に閉じ込めて「基板の上に載せた」ナノ構造体を原子操作で構築する新手法を開発した。

(4) 原子間力顕微鏡（AFM）によるナノ構造体の力学的評価だけでなく、走査型トンネル顕微鏡（STM）と複合化して、電子的物性も原子分解能で同時評価する事に成功した。

4. 今後の研究の推進方策

(1) 平成 22 年度に AFM を用いた力学的原子操作によって、室温で特定の原子を一箇所に集めて人工的に原子ワイヤや原子クラスタを作る実験手法を確立する。具体的には、ナノ空間内に室温の熱エネルギーで動き回る吸着原子を閉じ込めて、「室温」で「基板の上に載った」多元素ナノ構造体を構築する方法を確立する。

(2) 平成 23 年度にナノ空間内に構築した原子ワイヤや原子クラスタを、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で補償することによって、「室温」で AFM 測定と同時に走査型トンネル顕微鏡（STM）測定を行い、力学的物性だけでなく、局所電子状態密度や電子ポテンシャルのような電子的物性も原子レベルで明らかにする。

(3) 平成 22 年度に TiO_2 (110) 表面に小さい金の微粒子を蒸着する最適条件と、高分解能に観察する最適条件を解明する。

(4) 平成 23 年度に TiO_2 (110) 表面に蒸着した小さい金の微粒子を、「室温」で AFM 測定と同時に走査型トンネル顕微鏡（STM）測定を行い、HAADF STEM 像から導いた吸着モデルを検証し、さらに、個々の金原子と下地 TiO_2 (110) 表面原子との位置関係だけでなく力学的物性や電子的物性も原子レベルで明らかにする。また、その結果を、A02（エ）班と連携して理論計算・解析する。

5. 代表的な研究成果

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

1. S.Sadewasser, P.Jelinek, C.-K.Fang, O.Custance, Y.Yamada, Y.Sugimoto, M.Abe, and S.Morita, “New insights on atomic-resolution frequency-modulated Kelvin-probe force-microscopy imaging of semiconductors”, Phys.Rev.Lett. 査読有, Vol.103 (2009) 266103 (4pp).

2. O.Custance, R.Perez and S.Morita, “Atomic force microscopy as a tool for atom manipulation”, Nature Nanotechnology, 査読有,

Vol. 4 (2009) pp.803-810

3. Y.Sugimoto, P.Pou, O.Custance, P.Jelinek, M.Abe, R.Pérez and S.Morita, “Complex Patterning by Vertical Interchange Atom Manipulation Using Atomic Force Microscopy”, Science, 査読有, Vol.322 (2008) pp.413-417.

4. O.Custance and S.Morita, “How to Move an Atom”, Science, 査読有, Vol.319 (2008) pp.1051-1052.

5. S.Torbrügge, M.Reichling, A.Ishiyama, S.Morita and O.Custance, “Evidence of subsurface oxygen vacancy ordering on reduced CeO_2 (111)”, Phys.Rev.Lett. 査読有, Vol.99, (2007) 056101 (4pp).

〔図書〕（計 1 件）

1. S.Morita, F.J.Giessibl, R.Wiesendanger (Eds.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Series: NanoScience and Technology, “Noncontact Atomic Force Microscopy Volume 2”, 査読無 (2009) 総ページ数 401 ページ.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：原子間力顕微鏡及びそれを用いた相互作用力測定法

発明者：大田昌弘, 大藪範昭, 阿部真之, オスカル・クスタンセ, 杉本宜昭, 森田清三

権利者：株式会社島津製作所 および 国立大学法人大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2008/000001

出願年月日：2008/1/7

国内外の別：PCT 全加盟国(含・日本)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.afm.eei.eng.osaka-u.ac.jp/>