

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651116

研究課題名(和文)原子操作を用いた新物質創世のための原子サイズ反応場の構築

研究課題名(英文)Atomic-size reaction field for frontier material creation using atom manipulation experiments

研究代表者

阿部 真之(Abe, Masayuki)

大阪大学・極限量子科学研究センター・教授

研究者番号：00362666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、原子操作を用いた新物質創世を行うことを目標として、原子サイズの反応場を実現し原子操作実験によってナノクラスタを作成し、その性質を探ることを目的とした。具体的には、Si(111)-(7x7)のハーフユニットセルを原子サイズの反応場として利用し、AuやAg、Pbなどの金属を蒸着させ、原子操作によってクラスタを作成した。1種類の元素だけでなく、2種類の元素から合金状のクラスタを作成することに成功した。また、ハーフユニットセル内で作成できるAgやAuクラスタを構成する原子数の上限も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, using Scanning Tunneling Microscopy (STM) and Non-contact Atomic Force Microscopy (NC-AFM), we aimed at realizing atomic size reaction field and manufacturing nano-cluster composed of several atoms. We used half-unit-cells of the Si(111)-(7x7) surface as a small-size reaction place. We manipulated evaporated single atoms such as Pb, Au, and Ag to make nano-clusters. We successfully made alloy cluster composed of one and two elements on the reaction place. We also succeeded in revealing maximum number of the Ag or Au atoms that clusters.

研究分野：走査型プローブ顕微鏡

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学

キーワード：走査型プローブ顕微鏡 ナノ構造体 室温 原子操作 クラスタ

1. 研究開始当初の背景

これまで超高真空で動作する非接触原子間力顕微鏡 (Noncontact Atomic Force Microscope; NC-AFM) の高性能化を行い、半導体表面において原子操作実験を室温環境下で成功させてきた。近年、Si (111)-(7x7) 表面において、Au や Ag、Pb などの金属を蒸着させ、原子操作によって、一つのハーフユニットセル原子を集めることに成功した。この実験では、ハーフユニットセルが原子サイズのフラスコやピーカーのような反応場であり、AFM 探針は原子を注入するピペットのよう扱われる。例えば、ハーフユニットセル内では、吸着原子は (条件によるが) 自由に動き回り、最終的には3次元クラスタが形成される (AFM 探針によって形成される場合もあれば、自然に形成される場合もある)。

この研究をさらに発展させ、原子サイズの反応場に注入する原子の種類や数を変えていくことで、意図するままの反応をおこすことが出来れば、原子操作による新物質探索という新しい研究分野を構築できるのではないかという着想に至った。

2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究では、原子操作を用いた新物質創世を行うために、任意の大きさの原子サイズの反応場を実現し、さらに、原子サイズの反応場において、原子レベル反応場内における3次元クラスタ作成の安定性の解明、クラスタの原子レベル物性評価を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

これまで開発を行ってきた自家製 NC-AFM を用いて、室温超高真空において原子操作実験を行った。原子レベルの反応場を作成するためには、周辺よりもバリアハイトの高い境界で低い領域を囲む必要がある。そのような構造は、これまで実験を行ってきた Si (111)-(7x7) 表面のハーフユニットセルがある。また、試料表面に小さい穴 (ナノピット) を掘ることで実現可能であると考えた。バリアを超えて原子を移動させるには、AFM 探針をバリア近傍に近づけることでバリアハイトを下げることで行った。

4. 研究成果

実験を進めていくと、原子レベル反応場内における3次元クラスタ作成の安定性の解明と、クラスタの原子レベル物性評価に関して大きな進展があったので、特にそれに注力して実験を進めることにした。

その結果、Si (111)-(7x7) のハーフユニットセルを原子サイズの反応場として利用し、Au や Ag、Pb などの金属を蒸着させ、原子操作によってクラスタを作成した。1種類の元素だけでなく、2種類の元素から合金状のクラスタを作成することに成功した。また、ハーフユニットセル内で作成できる Ag や Au ク

ラスタを構成する原子数の上限も明らかにした。

具体的には、Si (111)-(7x7) 表面において、ハーフユニットセルを微小な反応場 (シャーレのようなものとする) として、原子操作によりナノ構造体の作成を行った。Au 原子1つがハーフユニットセル内で熱拡散している Si (111)-(7x7) 表面をつくり、Au 原子を隣接する別のハーフユニットセルへ移動させる実験を室温環境で行った。導電性 AFM 探針を Au 原子が存在しているハーフユニットセルに隣接する別のハーフユニットセル (ここには Au 原子が存在しない) に近づけると、Au 原子がジャンプして移ることがわかった。このとき、(1) 探針-試料間に流れるトンネル電流だけでなく Au 原子を経由するトンネル電流も存在すること、(2) ジャンプしてきた Au 原子を経由して探針-試料間に共有結合力が働くこと、Au 原子は探針先端にその位置をトラップされていることがわかった。さらに、同様の実験を、Ag 原子を用いて行った。同様の方法で1つのハーフユニットセルに Ag 原子を移動させていき Ag クラスタを作成した。Ag が12個のクラスタ (Ag₁₂) を作り実験を行った。Ag₁₂ からさらに Ag 原子や Ag₂ を加えて大きいクラスタを作ることを試みたが、その Ag 原子は周辺のハーフユニットセルを動きまわるだけでクラスタの中に入らないことがわかった。これは Ag₁₃ や Ag₁₄ が不安定であることを示唆している。クラスタの安定性実験を Au でも行った。Au₁₁ は隣接するハーフユニットセルに Au 原子が1つあると Au₁₀ に戻りやすく、Au₁₀ から Au₂ を加えて Au₁₂ が作れることも確認した。Au₁₁ はエネルギー的に準安定であると思われる。このように原子の種類によってクラスタの安定な個数がことなることを見出した。

実施予定であったイオン結晶の電子脱離実験に関しては、イオン結晶の原子分解能実験と脱離実験の準備を進めていたが、上述したとおり別の実験が進んだため、結果として当初の予定から遅れてしまった。

5. 主な発表論文等

(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 7 件)

Y. Sugimoto, M. Ondráček, M. Abe, P. Pou, S. Morita, Ruben Pérez, F. Flores, P. Jelinek: "Quantum degeneracy in atomic point contacts revealed by chemical force and conductance", *Physical Review Letters*, vol.111, pp.106803-1/-5 (2013).

Y. Sugimoto, A. Yurtsever, M. Abe, S. Morita, M. Ondráček, P. Pou, R. Pérez, and P. Jelinek: "Role of tip chemical reactivity on atom manipulation process in dynamic force microscopy", *ACS Nano*,

vol.7, pp.7370-7376 (2013).

A. Yurtsever, Y. Sugimoto, H. Tanaka, M. Abe, S. Morita, M. Ondráček, P. Pou, R. Pérez, and P. Jelínek: "Force mapping on hydrogen terminated Si(111)-(7x7) surface", *Physical Review B* Vol. 87, pp.155403-1/-10 (2013).

A. Sweetman, A. Stannard, Y. Sugimoto, M. Abe, S. Morita, and P. Moriarty: "Simultaneous noncontact AFM and STM of Ag:Si(111)-(3x3)R30°", *Physical Review B* Vol.87, pp.075310-1/-8 (2013).

A. Yurtsever, Y. Sugimoto, M. Fukumoto, M. Abe, and S. Morita: "Effect of tip polarity on Kelvin probe force microscopy images of thin insulator CaF₂ films on Si(111)", *Applied Physics Letters* Vol.101, pp.083119-1/-3 (2012).

A. Yurtsever, D. Fernández-Torre, C. González, P. Jelínek, P. Pou, Y. Sugimoto, M. Abe, Rubén Pérez, S. Morita: "Understanding image contrast formation in TiO₂ with force spectroscopy", *Physical Review B* Vol.85, pp.125416-1/-9 (2012).

Y. Sugimoto, K. Ueda, M. Abe, and S. Morita: "Three dimensional scanning force/tunneling spectroscopy at room temperature", *Journal of Physics: Condensed Matter* Vol.24, pp.084008-1/-7 (2012).

[学会発表](計 36 件)

K. Maeda, S. Yamazaki, R. Takatani, D. Sawada, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek, and S. Morita: "Force- and Current Induced All-Silicon Atom Switching", 1st KANSAI Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2014/2/3, Senri Life Science Center, Toyonaka, Osaka, Japan

Yoshiaki Sugimoto, Shiro Yamasaki, Eiichi Inami, Ayhan Yurtsever, Masayuki Abe, Seizo Morita: "Atom-Gating of Nano-Space Controlling Thermally Diffusing Single Atom Confined in Si(111)7x7 Half Unit Cell at Room Temperature", Symposium on Surface and Nano Science 2014 (SSNS '14), 2014/1/15-18, Furano, Hokkaido, Japan, at New Furano Prince Hotel.

E. Inami, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita: "Fabrication and Control of Pb-trimer Switch Operable at Room Temperature Using a combined AFM/STM", 12th International Conference on Atomically Controlled Surface, Interfaces and Nanostructure (ACSIN-12 & ICSPM21), 2013/11/4-8, Tsukuba International

Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan

S. Yamazaki, R. Takatani, K. Maeda, D. Sawada, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek, and S. Morita: "Current- and Force- Induced Si4 Atom Switching using STM and AFM", 12th International Conference on Atomically Controlled Surface, Interfaces and Nanostructure (ACSIN-12 & ICSPM21), 2013/11/4-8, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Y. Sugimoto, A. Yurtsever, M. Abe, and S. Morita: "Mechanical Gate Control for Atom-by-atom Clustering with Scanning Probe Microscopy", 12th International Conference on Atomically Controlled Surface, Interfaces and Nanostructure (ACSIN-12 & ICSPM21), 2013/11/4-8, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan

M. Ondracek, Y. Sugimoto, M. Abe, A. Yurtsever, J. Onoda, M. Setvin, S. Morita, and P. Jelinek: "Beyond Chemical Sensitivity in nc-AFM: Probing Bond Character", 12th International Conference on Atomically Controlled Surface, Interfaces and Nanostructure (ACSIN-12 & ICSPM21), 2013/11/4-8, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan

A. Yurtsever, Y. Sugimoto, M. Abe, S. Morita, M. Ondracek, P. Pou, R. Perez, and P. Jelinek, "Role of tip chemical reactivity on atom manipulation process in dynamic AFM", 12th International Conference on Atomically Controlled Surface, Interfaces and Nanostructure (ACSIN-12 & ICSPM21), 2013/11/4-8, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan

S. Yamazaki, R. Takatani, K. Maeda, D. Sawada, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek, and S. Morita: "Force- and Current- Induced Atom Switching", 16th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM2013), 2013/8/5-9, University of Maryland, Hyattsville, Maryland, USA

E. Inami, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita: "Control of atom switch of Pb trimer assembled on Si(111)-(7x7) surface using a combined AFM/STM at room temperature", 16th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM2013), 2013/8/5-9, University of Maryland, Hyattsville, Maryland, USA

Ayhan Yurtsever, Yoshiaki Sugimoto, Masaki Fukumoto, Masayuki Abe, and Seizo

Morita: "Effect of tip polarity on Kelvin probe force microscopy images of thin insulator CaF₂ films on Si(111)", 16th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM2013), 2013/8/5-9, University of Maryland, Hyattsville, Maryland, USA

Delia Fernandez-Torre, Ayhan Yurtsever, Jo Onoda, Yoshiaki Sugimoto, Masayuki Abe, Seizo Morita, and Ruben Perez: "A combined NC-AFM and DFT study of Pt atoms adsorbed on TiO₂(110)", 16th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM2013), 2013/8/5-9, University of Maryland, Hyattsville, Maryland, USA

阿部真之, 「非接触原子間力顕微鏡の測定技術」, 応用科学学会技術講演会, 2014/3/6, 関東学院大学 関内メディアセンター

杉本宜昭, M. Ondracek, 阿部真之, P. Pou, 森田清三, R. Perez, F. Flores, P. Jelinek, 「原子接合における力と電流の関係」, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014/3/27, 東海大学湘南キャンパス

杉本宜昭、Ayhan Yurtsever、Delia Fernandez-Torre、Cesar Gonzalez、Pavel Jelinek、Pablo Pou、阿部真之、Ruben Perez、森田清三: "AFM を用いたルチル TiO₂(110) 上のフォーススペクトロスコピー", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014/3/17-20, 青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県相模原市

鈴木将敬、山末耕平、阿部真之、杉本宜昭、長康雄: "非接触走査型非線形誘電率顕微鏡を用いた Si(100)-2×1 表面における双極子モーメント分布の観察", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014/3/17-20, 青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県相模原市

稲見栄一、杉本宜昭、阿部真之、森田清三 AFM/STM を用いた鉛クラスタースイッチの組立: "2013 年度関西薄膜表面物理セミナー", 2013/11/29-30, グリーンビレッジ交野, 大阪府交野市

山崎詩郎、高谷玲平、前田圭吾、澤田大輔、杉本宜昭、阿部真之、P. Pou、R. Perez、P. Mutombo、P. Jelinek、森田清三: "STM および AFM を用いた電流と力による Si 原子スイッチング", 2013 年度関西薄膜表面物理セミナー, 2013/11/29-30, グリーンビレッジ交野, 大阪府交野市

杉本宜昭、アイハン・ユルトセベル、福本将輝、阿部真之、森田清三: "ケルビンプローブ力顕微鏡の探針極性効果", 第 74 回応用物理学会春季学術講演会, 2013/9/16-20, 同志社大学京田辺キャンパス, 京都府京田辺市

稲見栄一、杉本宜昭、阿部真之、森田清三 Si(111)-(7×7) 表面における Pb 原子スイッチの組立と制御, "第 74 回応用物理学会春季学術講演会", 2013/9/16-20, 同志社大学京

田辺キャンパス,

〔図書〕(計 1 件)

阿部真之, 「LabVIEW FPGA ではじめる計測・制御」, ISBN-10: 4274503968, オーム社

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://abemasayuki.jimdo.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 真之 (ABE, Masayuki)

研究者番号: 00362666