

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03566

研究課題名(和文)原子間力顕微鏡による単原子の電気陰性度の計測

研究課題名(英文) Measurement of electronegativity of individual atoms using atomic force microscopy

研究代表者

杉本 宜昭 (Sugimoto, Yoshiaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00432518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：原子間力顕微鏡(AFM)を用いた化学結合力測定による単原子の元素同定が期待されている。これが実現すると、構成原子・欠陥・ドーパントが重要な役割を果たす触媒や微細化されたトランジスタなど、広い範囲の応用につながる。AFMを使えば、探針先端の1つの原子と表面の1つの原子との間の1対1の原子間力や結合エネルギーを精密に計測できる。今回、1932年にPaulingによって導入された電気陰性度の計測に成功した。それによって、原子が持つイオン性の情報を得ることができる。本研究は量子化学を単原子レベルで検証することにつながり、その知見は単原子の元素同定などへ応用することができる。

研究成果の概要(英文)：Non-contact atomic force microscopy (AFM) is one of the most powerful imaging techniques. Using AFM, one can measure individual atomic forces between the tip apex atoms and surface atoms. This unique technique allows us to verify the nature of the chemical bond established by Pauling along with the progress of quantum chemistry. Understanding the individual chemical bonds can be applied to atomic level surface analysis such as chemical identification and characterization of single atoms on various surfaces. We characterize individual chemical bonding force/energy by site-specific force spectroscopy. Various surface atoms with dangling bonds were prepared on the Si(111)-(7x7) surfaces. Dependence of the covalent bonding force/energy on different chemical species was systematically obtained. We also successfully characterized the polar bond. This polar bonding energy between two atoms with different electronegativity can be explained by Pauling's model.

研究分野：走査プローブ顕微鏡

キーワード：原子間力顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

電気陰性度は、1932年に Pauling によって導入され、その後、物理化学の基本概念となっている。共有結合では、2原子間で電子が対等に共有されるのに対して、イオン結合では、2原子間で電子が完全に移動する。Pauling は、この両者は極端な場合に過ぎず、実際には、ほとんどの結合はこれら2つの中間である極性結合であることを提唱した。そこで、原子が化学結合する際、電子を引きつける強さの尺度として電気陰性度を導入した。ある2原子間の化学結合を考えると、電気陰性度の差を調べれば、結合のイオン性の度合いを予測することができる。Pauling は、化学反応の熱力学的データによって、様々な元素で電気陰性度の数値を定めた。その後も研究は、たゆみなく行われ、今では電気陰性度は、周辺の化学環境に依存する量であると考えられている。しかし、電気陰性度を個々の原子に対して求める手法がなかったため、化学環境への依存性が未解明であった。電気陰性度は、分子内の電荷の分布(分極)や、未知の化学反応を予測するために、考えのよりどころにされている物理量である。したがって様々な化学状態の個々の原子に対して、データベース化することができれば、大変有用である。

2. 研究の目的

原子間力顕微鏡(AFM)を用いて、個々の原子の電気陰性度を計測する手法を確立し、電気陰性度の化学環境への依存性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

AFM は、鋭い探針を試料表面でスキャンさせ、探針にかかる微弱な力を測定することによって、表面の原子を観察する顕微鏡である。AFM を使えば、探針先端の1つの原子と表面の1つの原子との間の1対1の化学結合エネルギーを精密に測定できる。本研究課題では、高分解能かつ高感度なAFMにより、探針先端の原子と表面に吸着した様々なターゲット原子との間の化学結合エネルギーの測定を行った。そして、そこに含まれるイオン性の度合いを見積もることによって、電気陰性度を求めた。電気陰性度の測定対象の原子をSi(111)表面に吸着させ、その原子とAFMの探針先端のSi原子との間の化学結合エネルギーを測定した。そして、表面の参照用Si原子の化学結合エネルギーと比較することによって、電気陰性度を求めた。具体的には下記のような原理に基づいて求めた。説明のため、3つの原子を次のように定義する。

- ・ tip 原子：探針先端のSi原子
- ・ ref 原子：参照用の表面のSi原子
- ・ X 原子：電気陰性度の測定対象の表面の原子

Pauling の理論を適用すると、tip 原子と ref 原子との間の最大化学結合エネルギー

($E_{\text{tip-ref}}$)は下の式(1)のように表される。tip 原子と ref 原子は共に Si 原子で電気陰性度が等しい。したがって、式(1)の右辺は tip 原子同士の共有結合エネルギー($E_{\text{tip-tip}}$)と ref 原子同士の共有結合エネルギー($E_{\text{ref-ref}}$)の幾何平均となる。一方、tip 原子と X 原子の場合は、式(2)のように表される。式(2)の右辺の第一項は tip 原子同士の共有結合エネルギー($E_{\text{tip-tip}}$)と X 原子同士の共有結合エネルギー($E_{\text{X-X}}$)の幾何平均であり、第二項はイオン性が混ざるため生じる共鳴エネルギー()となる。これら式(1)と(2)から、実験と比較できる式(3)を導出できる。

$$E_{\text{tip-ref}} = \sqrt{(E_{\text{tip-tip}} \times E_{\text{ref-ref}})} \quad (1)$$

$$E_{\text{tip-X}} = \sqrt{(E_{\text{tip-tip}} \times E_{\text{X-X}}) + \Delta} \quad (2)$$

$$E_{\text{tip-X}} = \sqrt{(E_{\text{X-X}} / E_{\text{ref-ref}}) E_{\text{tip-ref}} + \Delta} \quad (3)$$

ここで、多数のAFM探針で $E_{\text{tip-X}}$ と $E_{\text{tip-ref}}$ の測定を行う。Si探針を表面に接触させて探針構造を変えると、共有結合の活性度が異なる探針を準備することができる。すると $E_{\text{tip-X}}$ と $E_{\text{tip-ref}}$ の値は探針によって異なる値をとり、散布図を作成することができる。そして、得られたデータ点に対して、線形フィットする。式(3)と比べることにより、直線の傾きはref原子とX原子に固有の値となり探針に依存しないので、X原子が元素同定できる。そして、切片からイオン性の寄与の度合いを求めることができる。最後に、Pauling が与えた次の式(4)により tip 原子と X 原子との間の電気陰性度の差が求まる。

$$\Delta = 1.3(\chi_{\text{tip}} - \chi_{\text{X}})^2 \quad (4)$$

ここで、 χ_{tip} 、 χ_{X} は、tip 原子、X 原子の電気陰性度であり、 Δ はeVを単位とする。本研究では、 χ_{tip} をSi原子の電気陰性度(1.8)とし、それを基準として、様々な原子の電気陰性度を決定していった。

4. 研究成果

以上の方法により、Ge, Sn, O, Al の電気陰性度を実験的に求めた。すると測定されたどの元素においても、理論で予測した通り、確かに線形でフィットできることがわかった。このようにして、Ge, Sn, O, Al の電気陰性度の値は、1.8, 1.8, 1.2, 3.1 と実験的に求めることができた。これらの値は、Pauling が設定した電気陰性度の値 1.8, 1.8, 1.5, 3.5 とよく一致している。

AFM のような局所的なプローブを用いることの利点は、個々の原子にアクセスして情報を得ることができる点にある。そこで、局所的に酸化させた Si 原子に対しても電気陰性度測定を行った。すると、2つのO原子と結合したSi原子の電気陰性度は2.25と求められ、酸化されていないSi原子よりも大きな値をとることがわかった。このような知見は、他の手法では得ることができなかった。AFM を用いて、個々の原子の電気陰性度を決定できるようになったことで、触媒材料など電子の授受が重要な系を原子レベルで調べる応用への道が切り拓かれた。

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 19件)

1. A. Shiotari, K. Tanaka, T. Nakae, S. Mori, T. Okujima, H. Uno, H. Sakaguchi, and Y. Sugimoto ‘Chiral Discrimination and Manipulation of Individual Heptahelicene Molecules on Cu(001) by Non-Contact Atomic Force Microscopy’ *The Journal of Physical Chemistry C* vol. 122 (2018) pp. 4997-5003 査読有
<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00487>
2. J. Onoda, K. Yabuoshi, H. Miyazaki, and Y. Sugimoto ‘High-resolution imaging of the silicene on Ag(111) surface by atomic force microscopy’ *Physical Review B* vol. 96 (2017) pp. 241302(R) 1-5 査読有
<http://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.241302>
3. A. Yurtsever, M. Abe, S. Morita, and Y. Sugimoto ‘Atom manipulation method to substitute individual adsorbate atoms into a Si(111)-(7x7) substrate at room temperature’ *Applied Physics Letters* vol. 111 (2017) pp. 233102 1-5 査読有
<http://dx.doi.org/10.1063/1.5008503>
4. B. Enkhtaivan, Y. Sugimoto, A. Oshiyama ‘First-principles study of lateral atom manipulation assisted by structural relaxation of a scanning tip apex’ *Physical Review B* vol. 96 (2017) pp. 155417 1-7 査読有
<http://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.155417>
5. E. Inami, Y. Sugimoto, T. Shinozaki, O. Gurlu, and A. Yurtsever ‘Investigation of atomic species in Pt-induced nanowires on Ge(001) surface by combined atomic force and scanning tunneling microscopy’ *Physical Review B* vol. 96 (2017) pp. 155415 1-7 査読有
<http://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.155415>
6. A. Yurtsever, M. Abe, S. Morita, and Y. Sugimoto ‘Role of lateral forces on atom manipulation process on Si(111)-(7x7) surface in dynamic force microscopy’ *Physical Review B* vol. 96 (2017) pp. 155412 1-8 査読有
<http://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.155412>
7. A. Shiotari, T. Nakae, K. Iwata, S. Mori, T. Okujima, H. Uno, H. Sakaguchi, and Y. Sugimoto ‘Strain-induced skeletal rearrangement of a polycyclic aromatic hydrocarbon on a copper surface’ *Nature Communications* vol. 8 (2017) pp. 16089 1-8 査読有
<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms16089>
8. J. Onoda, M. Ondracek, P. Jelinek, and Y. Sugimoto ‘Electronegativity determination of individual surface atoms by atomic force microscopy’ *Nature Communications* vol. 8 (2017) pp. 15155 1-6 査読有
<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms15155>
9. A. Yurtsever, D. Fernandez-Torre, J. Onoda, M. Abe, S. Morita, Y. Sugimoto, and R. Perez ‘The Local electronic properties of individual Pt atoms adsorbed on TiO₂(110) studied by Kelvin probe force microscopy and first-principles simulations’ *Nanoscale* vol. 9 (2017) pp. 5812-5821 査読有
<http://dx.doi.org/10.1039/c6nr07550a>
10. A. Shiotari, and Y. Sugimoto ‘Ultrahigh-resolution imaging of water networks by atomic force microscopy’ *Nature Communications* vol. 8 (2017) pp. 14313 1-7 査読有
<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms14313>
11. K. Iwata, S. Yamazaki, A. Shiotari, and Y. Sugimoto ‘Mechanical properties on In/Si(111)-(8x2) investigated by atomic force microscopy’ *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 56 (2017) pp. 015701 1-4 査読有
<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.56.015701>
12. A. Yurtsever, Jo Onoda, T. Iimori, K. Niki, T. Miyamachi, M. Abe, S. Mizuno, S. Tanaka, F. Komori, and Y. Sugimoto ‘Effects of Pb intercalation on the structural and electronic properties of epitaxial graphene on SiC’ *Small* vol. 12 (2016) pp. 3956-3966 査読有
<http://dx.doi.org/10.1002/sml.201600666>
13. E. Inami, and Y. Sugimoto ‘Combined atomic force microscopy and voltage pulse technique to accurately measure electrostatic force’ *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 55 (2016) pp. 08NB05 1-8 査読有
<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.55.08NB05>
14. Y. Sugimoto ‘Atomic Force Microscopy for Imaging, Identification and Manipulation of Single Atoms’ *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* vol. 14 (2016) pp. 28-34 査読有
<http://doi.org/10.1380/ejssnt.2016.28>
15. A. Yurtsever, J. Onoda, M. Abe, C.L. Pang, and Y. Sugimoto ‘Imaging the TiO₂(011)-(2x1) Surface using Noncontact Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy’ *The Journal of Physical Chemistry C* vol. 120 (2016) pp. 3390-3395 査読有
<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b11703>
16. J. Onoda, K. Niki, and Y. Sugimoto ‘Identification of Si and Ge atoms by atomic force microscopy’ *Physical Review B* vol. 92 (2015) pp. 155309 1-6 査読有
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.155309>
17. K. Iwata, S. Yamazaki, P. Mutombo, P. Hapala, M. Ondracek, P. Jelinek, and Y. Sugimoto ‘Chemical structure imaging of a single molecule by atomic force microscopy at room temperature’ *Nature Communications* vol. 6 (2015) pp. 7766 1-7 査読有
<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms8766>
18. E. Inami, and Y. Sugimoto ‘Accurate extraction of electrostatic force by a voltage-pulse force spectroscopy’ *Physical Review Letters* vol. 114 (2015) pp. 246102 1-5

Featured in Physics, Focus Stories 査読有
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.246102>

19. S. Yamazaki, K. Maeda, Y. Sugimoto, M. Abe, V. Zobac, P. Pou, L. Rodrigo, P. Mutombo, R. Perez, P. Jelinek, and S. Morita ‘Interplay between switching driven by the tunneling current and atomic force of a bistable four-atom Si quantum dot’ Nano Letters vol. 15 (2015) pp. 4356-4363 査読有
<http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00448>

〔学会発表〕(計 41 件)

1 杉本 宜昭, 小野田 穰, Ondracek Martin, Jelinek Pavel 「原子間力顕微鏡による表面原子の電気陰性度測定」日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22-25 日 東京理科大学、千葉県野田市 25 日 11:30-11:45 口頭発表 25aK603-9

2 杉本 宜昭, 小野田 穰, Ondracek Martin, Jelinek Pavel 「原子間力顕微鏡による軌道準位解析」第 65 回応用物理学会 春季学術講演会 2018 年 3 月 17-20 日 早稲田大学、東京都新宿区 19 日 13:15-13:30 口頭発表 19p-F210-1

3 藪押慶祐、小野田穰、宮寄洋記、杉本宜昭 「原子間力顕微鏡による Ag(111)表面上のシリセンの高分解能イメージング」第 65 回応用物理学会 春季学術講演会 2018 年 3 月 17-20 日 早稲田大学、東京都新宿区 19 日 13:30-13:45 口頭発表 19p-F210-2

4 Y. Sugimoto, J. Onoda and H. Miyazaki “The nature of the chemical bond verified by noncontact AFM” Forefront of Molecular Dynamics at Surfaces and Interfaces: from a single molecule to catalytic reaction (IIRC5) November 20th-23th, 2017, Hongo campus of Univ. Tokyo, Japan, 18:00-20:00 Poster, P33 Tuesday November 21th, 2017

5 H. Miyazaki, J. Onoda, and Y. Sugimoto “The measurement of electronegativity of individual atoms using chemically defined AFM tips” Forefront of Molecular Dynamics at Surfaces and Interfaces: from a single molecule to catalytic reaction (IIRC5) November 20th-23th, 2017, Hongo campus of Univ. Tokyo, Japan, 18:00-20:00 Poster, PS20 Tuesday November 21th, 2017

6 Y. Sugimoto, J. Onoda and H. Miyazaki “The Nature of the Chemical Bond Verified by Atomic Force Microscopy” The 8th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS8) October 22th-26th, 2017, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 11:20-11:40 Oral, 5aA2-2 Wednesday October 25th, 2017

7 H. Miyazaki, J. Onoda and Y. Sugimoto “The determination of electronegativity of single atoms using chemically defined AFM tips” The 8th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS8) October 22th-26th,

2017, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 11:40-12:00 Oral, 5aA2-3 Wednesday October 25th, 2017

8 Y. Sugimoto, J. Onoda, and H. Miyazaki “The nature of the chemical bond verified by force spectroscopy” 20th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2017) September 25th-29th, 2017, Garden Hotel Suzhou, Suzhou, China, 14:40-15:00 Oral, Monday September 25th, 2017

9 H. Miyazaki, J. Onoda, and Y. Sugimoto “The measurement of electronegativity of individual atoms using chemically defined AFM tips” 20th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2017) September 25th-29th, 2017, Garden Hotel Suzhou, Suzhou, China, 18:00-21:00 Poster, P06, Tuesday September 26th, 2017

10 杉本 宜昭, ユルトセベル アイハン, フェルナンデス デリア, 小野田 穰, 阿部 真之, 森田 清三, ペレッツ ルベン 「TiO₂(110)表面上 Pt 単原子のケルビンプローブ力顕微鏡測定」第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会 2017 年 9 月 5-8 日 福岡国際会議場、博多 7 日 9:30-9:45 口頭発表 7a-C24-1

11 宮寄 洋記, 小野田 穰, 杉本 宜昭 「終端元素が規定された AFM 探針による単原子の電気陰性度測定」第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会 2017 年 9 月 5-8 日 福岡国際会議場、博多 7 日 10:30-10:45 口頭発表 7a-C24-5

12 杉本 宜昭 「原子間力顕微鏡を用いた化学結合力計測」2017 年真空・表面科学合同講演会 2017 年 8 月 17 日- 19 日 横浜市立大学金沢八景キャンパス 19 日 口頭発表 3Bp08 依頼講演

13 宮寄洋記, 小野田穰, 杉本宜昭 「AFM 探針の先端原子の元素同定」2017 年真空・表面科学合同講演会 2017 年 8 月 17 日- 19 日 横浜市立大学金沢八景キャンパス 19 日 口頭発表 3Ap03S

14 小野田 穰, Ondracek Martin, Jelinek Pavel, 杉本 宜昭 「原子間力顕微鏡による単原子の元素識別」第 64 回応用物理学会 春季学術講演会 2017 年 3 月 14-17 日 パシフィコ横浜、神奈川県横浜市 14 日 9:30-9:45 口頭発表 14a-414-1

15 宮寄 洋記, 小野田 穰, 塩足 亮隼, 杉本 宜昭 「Al 蒸着 Si(111)-(7x7)上のフォーススペクトロスコピー」第 64 回応用物理学会 春季学術講演会 2017 年 3 月 14-17 日 パシフィコ横浜、神奈川県横浜市 14 日 16:15-16:30 口頭発表 14p-414-12

16 杉本 宜昭 「AFM による個々の原子のフォーススペクトロスコピー」日本顕微鏡学会 走査型プローブ顕微鏡分科会 研究会 「超高真空原子間力顕微鏡の最前線」2017 年 2 月 3 日 産業技術総合研究所 臨海副都心センター 本館 4 階 第 1 会議室、東京都江東区 3 日 14:40-15:10 依頼講演

17 J. Onoda, M. Ondráček, P. Jelinek and Y.

Sugimoto “Electronegativity of Individual Surface Atoms Determined by AFM” 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM24) December 14th-16th, 2016, Hawaii Convention Center, Honolulu, USA, 10:59, Friday December 16th, 2016, S8-4

18 J. Onoda, M. Ondráček, P. Jelínek and Y. Sugimoto “Chemical Identification of Individual Surface Atoms by AFM” 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM24) December 14th-16th, 2016, Hawaii Convention Center, Honolulu, USA, 20:00-22:00, Wednesday December 14th, 2016, S4-37

19 J. Onoda, A. Yurtsever, M. Abe, C. L. Pang and Y. Sugimoto “Characterization of TiO₂(011)-(2×1) Surface by AFM and STM” 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM24) December 14th-16th, 2016, Hawaii Convention Center, Honolulu, USA, 20:00-22:00, Wednesday December 14th, 2016, S4-36

20 J. Onoda, M. Ondráček, P. Jelínek, and Y. Sugimoto “Chemical Identification of Individual Surface Atoms by AFM” 分子研研究会「表面科学の最先端技術と分子科学～第7回真空・表面科学若手研究会～」2016年12月2日 分子科学研究所 明大寺キャンパス 研究棟 201号室 ポスター発表 P7

21 杉本 宜昭 「原子間力顕微鏡を用いた単原子分子計測」分子研研究会「表面科学の最先端技術と分子科学～第7回真空・表面科学若手研究会～」2016年12月2日 分子科学研究所 明大寺キャンパス 研究棟 201号室 12:50-13:50 依頼講演

22 小野田 穰, Ayhan Yurtsever, 阿部 真之, Pang Chi Lun, 杉本 宜昭 「AFM/STMによるTiO₂(011)表面の解析」2016真空・表面科学合同講演会 2016年11月29日-12月1日 名古屋国際会議場、愛知県名古屋市 30日 ポスター発表 2PB25

23 宮寄 洋記, 小野田 穰, 杉本 宜昭, 塩足亮隼 「非接触原子間力顕微鏡によるAlナノクラスターの研究」2016真空・表面科学合同講演会 2016年11月29日-12月1日 名古屋国際会議場、愛知県名古屋市 29日 口頭発表 1Dp09

24 小野田 穰, Ondracek Martin, Jelinek Pavel, 杉本 宜昭 「原子間力顕微鏡による単一原子の電気陰性度の決定」2016真空・表面科学合同講演会 2016年11月29日-12月1日 名古屋国際会議場、愛知県名古屋市 29日 口頭発表 1Dp07

25 宮寄 洋記, 仁木 康平, 塩足 亮隼, 杉本 宜昭 「室温STMを用いたAuナノクラスターの作製とその特性評価」物性研短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」2016年10月31日-11月1日 東京大学物性研究所大講義室 31日 18:00-20:00 ポスター発表 P5

26 宮寄 洋記, 小野田 穰, 塩足 亮隼, 杉本

宜昭 「非接触原子間力顕微鏡を用いたAlナノクラスターの弾性測定」日本表面科学会関東支部第4回関東支部セミナー 表面・薄膜分析シリーズ Vol.2 2016年10月18日 東京大学理学部化学館(化学本館)5階講堂 14:30-15:30 ポスター発表 P-1

27 小野田 穰, Ayhan Yurtsever, 阿部 真之, Chi Lun Pang, 杉本 宜昭 「TiO₂(011)-(2×1)表面のAFM/STMによる研究」第77回応用物理学会 秋季学術講演会 2016年9月13-16日 朱鷺メッセ、新潟県新潟市 15日 13:30-15:30 ポスター発表 15p-P4-9

28 宮寄 洋記, 小野田 穰, 杉本 宜昭 「非接触原子間力顕微鏡によるAlナノクラスターの研究」第77回応用物理学会 秋季学術講演会 2016年9月13-16日 朱鷺メッセ、新潟県新潟市 14日 14:15-14:30 口頭発表 14p-A32-5

29 小野田 穰, Martin Ondracek, Pavel Jelinek, 杉本 宜昭 「原子間力顕微鏡による単一原子の電気陰性度測定」第77回応用物理学会 秋季学術講演会 2016年9月13-16日 朱鷺メッセ、新潟県新潟市 14日 10:30-10:45 口頭発表 14a-A32-5

30 J. Onoda, M. Ondracek, P. Jelinek and Y. Sugimoto “Electronegativity of single atoms determined by atomic force microscopy” 20th International Vacuum Congress (IVC-20) August 21st-26th, 2016, BEXCO (Busan Exhibition Convention Center), Busan, Korea, 15:30-15:45 Oral, Tuesday August 23rd, 2016

31 J. Onoda, M. Ondráček, P. Jelínek and Y. Sugimoto “Electronegativity of individual surface atoms determined by AFM” 19th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2016) July 25th-29th, 2016, East Midlands Conference Centre, Nottingham, UK, 11:00-11:20 Oral, Wednesday July 27th, 2016

32 J. Onoda, A. Yurtsever, M. Abe, C. L. Pang and Y. Sugimoto “TiO₂(011)-(2×1) Surface characterized by atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy” 19th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2016) July 25th-29th, 2016, East Midlands Conference Centre, Nottingham, UK, Poster, P:27

33 小野田 穰, Chi Lun Pang, Ayhan Yurtsever, 杉本 宜昭 「TiO₂(110)表面上の帯電領域のNC-AFM/KPFM観察」第63回応用物理学会 春季学術講演会 2016年3月19-22日 東京工業大学 大岡山キャンパス

34 小野田 穰, 仁木 康平, 杉本 宜昭 「非接触原子間力顕微鏡を用いたSiとGe原子の識別」第63回応用物理学会 春季学術講演会 2016年3月19-22日 東京工業大学 大岡山キャンパス

35 小野田 穰, 仁木 康平, 杉本 宜昭 「SiGe混晶表面での非接触原子間力顕微鏡による元素識別」2015年真空・表面科学合同講演会

2015年12月1-3日 つくば国際会議場、茨城県つくば市1日口頭発表 1Da05R

36 J. Onoda, K. Niki and Y. Sugimoto “Identification of Individual Si and Ge Atoms by AFM” 10th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '15 (ALC '15) October 25th-30th, 2015, Kunibiki Messe, Matsue, Japan, 11:30-11:50 Oral, Friday October 30th, 2015, 30a-A-6

37 小野田穰, 仁木康平, 杉本宜昭 「原子間力顕微鏡を用いた Ge/Si 混在表面での元素識別」日本物理学会 2015年秋季大会 2015年9月16-19日 関西大学 千里山キャンパス

38 J. Onoda, C. L. Pang, A. Yurtsever and Y. Sugimoto “Exclusion of H atoms at the subsurface charged regions on TiO₂(110)” 18th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2015) September 7th-11th, 2015, Cassis Convention Center “Oustau Calendal”, Cassis, France, 18:00-20:00 Poster, Wednesday September 9th, 2015, P-Wed-46

39 J. Onoda, K. Niki and Y. Sugimoto “Chemical identification on the Si-Ge intermixed surfaces by AFM” 18th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (nc-AFM 2015) September 7th-11th, 2015, Cassis Convention Center “Oustau Calendal”, Cassis, France, 14:20-14:40 Oral, Monday September 7th, 2015

40 K. Niki, J. Onoda, and Y. Sugimoto “Chemical Identification of Si and Ge atoms by AFM force spectroscopy” NIMS Conference 2015 July 14th-16th, 2015, Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, 17:30-19:30 Poster, Wednesday July 15th, 2015, P029

41 J. Onoda, C.L. Pang, A. Yurtsever, Y. Sugimoto, and G. Thornton “(2n×1) Reconstructions of TiO₂(011) Elucidated by AFM and STM” NIMS Conference 2015 July 14th-16th, 2015, Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, 17:30-19:30 Poster, Wednesday July 15th, 2015, P028

〔その他〕

ホームページ

<http://www.afm.k.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 宜昭 (SUGIMOTO Yoshiaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00432518