JAIST Repository

https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	電圧印加非接触原子間力顕微鏡 / 分光法による固体表 面間の結合形成過程の解析			
Author(s)	富取,正彦			
Citation	科学研究費補助金研究成果報告書: 1-6			
Issue Date	2012-06-04			
Туре	Research Paper			
Text version	publisher			
URL	http://hdl.handle.net/10119/10591			
Rights				
Description	研究種目:基盤研究(A),研究期間:2008~2011, 課題番号:20246012,研究者番号:10188790,研究分 野:表面科学、ナノプローブテクノロジー,科研費の 分科・細目:応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物 性			



Japan Advanced Institute of Science and Technology

科学研究費助成事業(科学研究費補助金)研究成果報告書

平成24年6月4日現在

(公姑出告,田)

機関番号:13302				
研究種目:基盤研究(A)				
研究期間:2008~2011				
課題番号:20246012				
研究課題名(和文)				
電圧印加非接触原子間力顕微鏡/分光法による固体表面間の結合形成過程の解析				
研究課題名(英文) Analysis of binding formation between solid surfaces by				
bias voltage non-contact atomic force microscopy/spectroscopy				
研究代表者				
富取 正彦(TOMITORI MASAHIKO)				
北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・教授				
研究者番号:10188790				

研究成果の概要(和文):

電圧印加非接触原子間力顕微鏡/分光法(Bias nc-AFM/S)を発展させ、試料表面上の原子・ 分子と探針先端原子の結合形成、電子状態変化を調べた。一例として、Si(111)7x7表面にHを 吸着させると、H-Si吸着原子とSi探針の力は弱く電流も減少し、H-隣接Siレスト原子の場合、 Si吸着原子とSi探針に働く力は強く電流が増加した。Si-Si間の結合力は電子のトンネル遷移 過程と同様、局所電子状態密度に強く依存する。

研究成果の概要(英文):

We improved our method of bias nc-AFM/S, and applied this to analysis of binding formation between a surface and a tip, and of electronic states between them. For instance, on H-terminated Si(111)7 \times 7, the force between the Si adatom terminated with H and a Si tip is weaker and the current between them is less. The force between them, where the Si rest atom neighboring the Si adatom is terminated with H, is stronger and the current is larger. This indicates that the force between Si and Si strongly depends on surface local density of states as well as electron tunneling process does.

交付決定額

			(並領中位・口)
	直接経費	間接経費	合計
2008年度	15, 500, 000	4,650,000	20, 150, 000
2009 年度	11, 700, 000	3, 510, 000	15, 210, 000
2010年度	5, 300, 000	1, 590, 000	6, 890, 000
2011 年度	5, 400, 000	1, 620, 000	7, 020, 000
総計	37, 900, 000	11, 370, 000	49, 270, 000

研究分野:表面科学、ナノプローブテクノロジー

科研費の分科・細目:応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性 キーワード:走査プローブ顕微鏡、表面・界面物性、相互作用力、ナノコンタクト、結合力、コ ンダクタンス、トンネル障壁

1. 研究開始当初の背景

1980 年代に走査型トンネル顕微鏡 (STM (scanning tunneling microscopy)) と原子 間力顕微鏡 (AFM (atomic force microscopy)) が登場して以来、その動作原理を応用して多 様な走査型プローブ顕微鏡 (SPM (scanning probe microscopy)) が開発されてきた。「先 端が鋭利な探針を試料に近接させ、そのとき 探針と試料間で授受される物理量を一定に 保ちながら探針を走査することによって表 面像を得る」という SPM の原理は単純である。 その単純さと"原子が見える"という特筆 すべき性能が、種々の分野の研究者達に様々 なインスピレーションを与えた。その結果、 ナノスケールの表面観察・物性測定や原子・ 分子操作の技術が飛躍的に進歩し、SPM は汎 用装置の一つとして多方面で活用されるに 至った。この流れに呼応するように、無機・ 有機・バイオ材料のナノスケールでの評価と その理解、制御技術が飛躍的に発展した。

SPM の中でも、高分解能で絶縁材料も観察 できる AFM がもっとも普及した。開発当初、 AFM では原子分解能を達成できないとの予想 もあった。しかし、微弱な探針-試料間引力 を 検 出 で き る 周 波 数 変 調 (frequency modulation (FM))法を利用した非接触原子 間力顕微鏡 (noncontact (nc)-AFM) が開発 され、1995年以降は原子像が観察されるよう になった。原子分解能 SPM 像を得るためには 探針先端が原子レベルで鋭利である必要が ある。一般に、探針先端の構造・状態が変化 すれば、得られる SPM 像もそれに応じて変化 する。見方を変えれば、探針も一つの"ナノ 機能材料"である。探針の"ナノスケールで 鋭利な形とその物性"が、試料表面の形状を 高分解能で描きださせ、また物性を計測させ、 さらには原子・分子の操作を可能にさせてい る。一方、SPM 像あるいは測定量の実体は、 試料と探針の2つの物体の近接よって変化 する物理状態量のナノスケールでの3次元 空間変化である。ただし、量子効果を含めた ナノスケールでの「探針と試料の絡み合い」 が物理状態量を変化させる主原因であり、そ こで起きる現象を的確に分析することは容 易ではない。この「絡み合い」を解きほぐす ことは物理的に興味深く、ナノテクノロジー への応用からも重要である。量子効果を含め て、ナノスケールで鋭利な探針がもつ特性の 理解と制御が一つの鍵になっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、SPM を基に独自開発した 電圧印加非接触原子間力顕微鏡法/分光法 (Bias nc-AFM/S (spectroscopy)) 法を発展 させ、探針と試料を極接近させたときに試料 表面上の特異的原子・分子と探針先端原子と の間で進行する結合形成の過程・電子状態の 変化を明らかにすることである。Bias nc-AFM/S では、「探針-試料間印加電圧をチュ ーニングすることによって SPM 探針先端の電 子準位と試料表面原子の電子準位の間に形 成される電子共鳴(結合)状態」を、印加電 圧に対する相互作用引力の増加として検出 する。そこで本研究では、探針が試料表面か ら 1 nm ほど離れている「トンネル障壁を挟 んで相互作用が弱い状態」、0.5 nm ほどの「ト ンネル障壁が崩壊し始めた状態」を経て、極 めて接近した「化学結合が形成できる状態」 へと探針ー試料間距離を精密に制御しつつ印 加電圧を掃引し、探針ー試料間の相互作用引 力・トンネル電流/(疑似)接触電流・エネ ルギー散逸・トンネル障壁の印加電圧に対す る変化を高感度で同時計測する。試料表面上 の探針位置を変えてはこの計測を繰り返し、 結合形成の原子スケールの顕微分光情報を 得る。

3.研究の方法

本研究を進めるために、下記の工夫を凝ら した改良・試験を重ねつつ、実験を行った。 (1) 既存 Bias nc-AFM/S の改良

現有の超高真空 (ultra-high vacuum (UHV)) Bias nc-AFM/S システムを改良し、探 針と試料間に働く相互作用力の高感度測定、 電流・エネルギー散逸等の同時計測のための 高感度を行う。現有システムはピエゾ抵抗効 果を利用した Si カンチレバーを使用してい る。相互作用力によって引き起こされるカン チレバーの曲がりがピエゾ抵抗の変化をも たらす。その変化をホイートストンブリッジ 回路で計測している。これを改良する。コモ ンモード除去比(CMRR)の高い広帯域差動増 幅器(帯域 400 kHz, ゲイン 200 倍)を導入 する。AC 入力結合、周波数可変プログラマブ ルフィルター、ノイズフィルターを導入して、 高感度化を図る。ピエゾ抵抗には個々にバラ ツキがあるので、高精度ポテンショメータを 内蔵させた調整機構を有するブリッジ回路 を自作する。ブリッジ回路への印加電圧を制 御することによって、Si 探針を加熱しながら 観察・測定することも可能となる。計測シス テムに多チャンネル AD 変換回路を増設し、 合わせて計測プログラムの改良を行う。電流 アンプも市販品を改良し、外部から探針--試 料電圧を変化できるようにする。また、チャ ージ敏感型広帯域電流アンプを導入し、探針 - 試料間の変調による電流の時間分解計測が 可能かをテストする。

(2)水晶振動子センサー

上記のピエゾ抵抗カンチレバーに加え、 市販の音叉型水晶振動子を力センサーとし て応用する。水晶振動子センサーはヤング率 の高い材料であり、微小振幅で励振したとき に起こる探針と試料の凝着を抑制できる。ま た、力測定には、探針と試料間の相互作用に よる水晶振動子センサーの共振周波数の変 化を FM 法で測定する。水晶振動子は温度安 定性の良い材料であり、nc-AFM 力測定センサ ーとして優れたものとなる。また、水晶振動 子センサーを励振する回路としてピエゾ効 果自励発振方式を採用する。その際、励振信 号が水晶振動子の寄生容量や配線間の浮遊 容量を介して電流-電圧変換回路へ微分信号 として流れ込んでくる。そこで、この電流信 号を補償する回路を製作する。水晶振動子は 音叉型なので、その一方のプロング(足)を 固定する q-Plus センサー方式を採用する。 プロングの固定の仕方によって振動子とし

てのQ値(励振エネルギーの蓄積効率の良さ を表す)が高くなるように調整する。また、 他端のプロングには探針を装着する。Pt-Ir 線を電解研磨して先端を鋭利にしたものを 接着したり、市販のSiカンチレバーのSi探 針を接着して、探針とする。

(3)探針調製

探針準備として幾つかの工夫を行う。用い たピエゾ抵抗カンチレバーのカンチレバー 部および探針先端部にはBが高ドープされて いる。その結果、カンチレバーの根本から探 針先端まで導電性がある。一般に市販されて いる Si カンチレバーと同様に、本カンチレ バーも Si (001) ウェハーから作製され、探針 は[001] 方位の単結晶 Si である。通常、市販 のカンチレバー端の Si 探針先端には自然酸 化膜の形成や有機汚染物の付着が認められ る。前処理としてこれらの除去を行う。ま ず、ピエゾ抵抗型カンチレバー端の Si 探針 を超高真空(UHV) 走査型オージェ電子顕微 鏡(SAM、最小電子ビーム径、約15nm)で評 価する。探針の調製として、ピエゾ抵抗への 電流導入による抵抗加熱(1000 ℃程度まで 可能。)、および、SAM に付属しているアルゴ ン (Ar) イオンスパッター銃で Si 探針を清 浄化する。また、スパッターのダメージを回 復するために熱処理(600 ℃程度)する。 その汚染度の評価は処理の都度、SAM で行 う。nc-AFM 装置への大気中移送の際にカン チレバー端の Si 探針が酸化されたり、汚染 される恐れがある。そこで、SAM からカンチ レバーを取り出す前に、UHV SAM チャンバー に酸素を約10-6 Torr 導入したうえで、カンチ レバーを約600 ℃に加熱して清浄なシリコ ン酸化薄膜を探針先端に形成する。この酸化 膜はUHV 中で600 ℃に加熱することによって 除去することができる(大気中を移送した際 に付着する炭素系の汚染物が600 ℃の加熱 で除去できることは、SAM 分析で確認済みで ある)。nc-AFM 装置の UHV チャンバーへ移送 した後に、走査前にピエゾ抵抗に電流を流し て加熱し、炭素系汚染物と共々、酸化薄膜を 除去する。また、UHV-AFM の機構を利用し て、Si 探針先端に単結晶 Si ナノピラーを 成長させる。AFM 試料ステージに設置した Si 基板を通電加熱(約600℃)し、接触電 流をモニターしながらカンチレバーの Si 探針を試料に接触させる。電流の変化をモ ニターしながら、その後ゆっくりと探針を 試料から引き離す。すると、探針と試料の 間には小さな架橋構造が形成される。さら にゆっくりと探針を引き上げつつ、その架 橋構造を切断する。その結果、Si 探針先端 には単結晶 Si のナノピラーが形成される。 このSiナノピラーをAFM 観察用の探針とし て利用する。Si 探針を加熱しながら試料に接 近させ、探針と試料間に高電界を印加する高

温高電界(thermal-field(TF))処理も行う。 この処理は劣化した探針を再生する優れた 方法で、高電界中で分極した原子・分子が高 電界領域に引き寄せられ、先端が更に尖る。 加熱は分極原子・分子の移動を増長する役割 である。また、AFM 装置の UHV チャンバー中 にタングステン (W) ワイヤーをフィラメン ト状にした自作の水素クラッカーを導入す る。観察・測定によってはこの₩ワイヤーを 1500 ℃に加熱し、その加熱ワイヤーに水素 分子を照射したときに起こる加熱₩表面での 水素分子の原子状水素への解離脱離反応を 利用して原子状水素を発生させる。清浄 Si ナノピラーに原子状水素を照射するすると、 Si ナノピラー探針先端の Si ダングリングボ ンドが水素で終端化される。この水素終端探 針で観察・測定し、変化を調べる。さらには、 収束イオンビーム (focused ion beam (FIB)) で先端を先鋭化した Si 探針を準備する。ま た、清浄な Si 探針先端に Ge を UHV 中で蒸着 し、その先端表面に Ge のナノクラスターを 成長させる。この Ge-Si 探針を FIB で先鋭化 し、探針として用いる。先端には Ge が残存 し、その多面体的クラスターの鋭角な角が先 鋭な探針として機能すること、また、電子状 態の違いがもたらす変化を調べる。これらの 評価には、動作環境を大気、純ガス(Ar、N₂、 H₂、および原子状水素)、真空、あるいは液中 に変えられる nc-AFM 装置を合わせて利用す る。

(4) 試料調製

試料として、基準試料となる清浄 Si(111)7 ×7 再配列表面構造を UHV 中で 1200 ℃以上 に加熱することで準備する。さらに、その基 板を300 ℃に加熱したまま、原子状水素(水 素分子ガス圧 10⁻⁸ Torr、10 分、タングステ ンフィラメントの温度 1500 ℃の条件で発 生)を照射して、表面の Si ダングリングボ ンドを部分的に水素終端する。このとき、初 期的に表面の Si レスト原子のダングリング ボンドが、その後、表面吸着 Si 原子のダン グリングボンドが水素終端される。そのとき、 水素終端された Si レスト原子から周辺の表 面吸着 Si 原子へ余剰電子が電荷移動するこ とが知られている。また、清浄 Si (111)7×7 表面、あるいはSi(001)2×1表面に室温で有 機分子 DAT (4,4"-diamino-p-terphenyl) を 蒸着する。この分子は、3つのベンゼン環が 直鎖状に繋がり、その直鎖の両末端にはアン モニア基 (NH₂) がそれぞれ1個ずつ結合して いる。電子状態として π 共役系の分子である。 NH。基は Si 基板表面のダングリングボンドと 結合することが知られている。従って、DAT 分子が一端のNH。基でSi表面と結合した表面 にさらにカルボニル基を持つ分子を蒸着す ると、DAT 分子の他端の NH。基と水分子脱離反 応が進む。カルボニル基を両末端に持つ π共

役系分子を利用し、DAT 分子と交互に蒸着を 繰り返せば、任意の長さのπ共役系分子をSi 基板上に形成できる。有機EL 材料や電子デ バイスへの応用が期待されている系である。 結合状態をSTM、X線光電子分光法(X-ray photoemission spectroscopy(XPS))、第一 原理計算で併せて解析する。

試料対象は、代表的酸化物であるルチル型 TiO₂へも拡大する。TiO₂は光触媒機能を持つ ことが知られ、透明電極、色素増感太陽電池 などへの応用も期待されている。TiO₂(110)、 (100)を大気中加熱(1000 ℃、1-48時間) で準備する。あるいは、UHV中でArイオンス パッターと加熱を繰り返し、清浄化する。こ の表面にリチウムや炭酸プロピレン分子を UHV中で蒸着してリチウム電池の電極を模し た基板を用意し、吸着状態を調べる。リチウ ムの電荷移動による状態変化を解析する。ま た、色素増感太陽電池電極を模してN3 色素 分子を有機溶媒中で担持させ、その吸着状態 と光応答を nc-AFM で調べる。

4. 研究成果

原子状水素を吸着させた Si(111)7x7 表面 をBiasnc-AFM で印加電圧を変化させながら nc-AFM 像と電流像を同時に取得した。利用し た探針はピエゾ抵抗カンチレバーの Si 探針 である。すると、H が吸着した表面吸着 Si 原 子と Si 探針の間に働く結合力は弱くなり、 電流も減少した。一方、Si レスト原子に H が 吸着した場合、隣接した表面吸着 Si 原子と Si 探針の間に働く結合力は強くなり、電流も 増加した。この結果は、Si-Si 原子間の共有 結合力は電子のトンネル遷移過程と同様、局 所電子状態密度に強く依存することを示唆 する。nc-AFM が原子の位置そのものを描きだ しているという従来の nc-AFM の描像に議論 を呼び起こすものである。また、水素が吸着 していると予想される Si 探針で走査したと ころ、偶発的に Si レスト原子が究めて強調 されて観察された。探針先端の状態を走査中 に規定できる評価法は存在しないので、この 観察時に Si 探針先端に実際に H が存在した かは不明確である。しかし、ほぼ2電子で占 有されている Si レスト原子と H の反応性の 高さが関連していることが示唆される。

Hの照射量を増加させると、Si(111)が特異 面でエッチングされることを調べた。エッチ ングのされ方は面方位に依存する傾向があ り、下地の結晶の対称性を反映した3回対称 性を示した。同時に、Si探針も側面や特定の 稜に沿ってエッチングが進むことを実験後 の Si 探針の SEM 観察で確認した。これらの 特性を利用したその場観察・加工を実現でき る可能性がある。

DAT 分子を Si (111) 7×7 に蒸着すると、予 想通り、DAT の片端の NH。基が表面吸着 Si 原

子と結合し、もう一端の NH。基が基板から自 由に存在していることが分かった。この結果 は、STM 観察と併せ、分子蒸着量を変化させ、 また、XPS の N(1s)のピークの変化を詳細に 解析して求めたものである。吸着構造として、 DAT の主鎖が Si(111) 基板に対して斜めに立 位し、その方向は DAT が結合している表面吸 着 Si 原子に隣接した Si レスト原子の方向に 傾いていた。Si レスト原子とDAT の主鎖のベ ンゼン環がもつ水素原子の間で引力相互作 用が働いている可能性が高い。一方、 Si(001)2×1 表面に DAT を蒸着すると、両末 端が Si と結合し、DAT の主鎖が基板に沿って 伏せていること、その配置は Si ダイマー列 上で、ダイマー列の方向から 17 °程度傾い ていた。試料電圧を変化させると、主鎖のベ ンゼン環が3個に分離されて観察されたり、 端の2個のベンゼン環のみが明るく観察され た。第一原理計算によると、中央のベンゼン 環が下地の Si ダイマーと結合(バタフライ 結合)し、その結果、主鎖の電子状態が変化 していることが示唆された。この2つの Si 基板に蒸着された DAT の上に正孔輸送材料で あるα-NPD 分子、さらには A1 電極を真空中 で蒸着した。そして、これらの素子の電流-電圧特性を SPM の機構を利用して UHV 中で計 測した。簡易分子素子として DAT の存在が、 分子同士の交叉に影響を与えている可能性 を示せた。また、Si 基板に整然と化学結合し た DAT が、その上に蒸着した α-NPD の特性を 向上させ、従来の成膜法に比べ比抵抗が高く なることを見出した。優れた特性を持つ分子 素子作製の際に、結合と電流特性の制御が重 要であることが示された。

試料調製の過程の中で、大気中でTiO₂(110) を石英容器内で熱処理すると、石英容器から Siが基板に飛来し、TiO₂表面にSiO₂極薄膜が エピタキシャルに成長することが見出され た。これは本研究で得られた副次的成果であ る。現在、この特異な薄膜形成の機構、その 膜の特性の評価を進めている。

本研究を通して、下記の考察を行った。AFM での絡み合いは、よく知られているように探 針と試料間に働く相互作用力である。静電気 力や van der Waals 力などの遠距離力から化 学結合力に代表される近距離力までの種々 の相互作用の合力である。しかし、起源に基 づいて合力を分離・解析することは容易では ない。一般に半導体表面などで nc-AFM 像が 原子分解能を示す場合、近距離で支配的な化 学結合力(共有結合)が画像形成に大きく寄 与しているとされる(イオン結晶の場合は、 結晶表面の正負イオンと探針先端間の局所 的静電気力の寄与が大きいとされる)。従来、 AFM による探針--試料間相互作用力の解析は おもに力-距離曲線の測定結果から力の空間 変化を議論して、遠距離力と近距離力とに分

離し、解析されてきた。一方、力の起源を表 面電子 (エネルギー) スペクトロスコピーに 対応する意味で"分光"するという観点か ら、探針-試料間印加電圧を変化させて静電 的力変化やそれに伴う探針-試料間のトンネ ル・コンダクタンス変化を明らかにしようと する試みはほとんどなかった(ただし、応用 的重要性から、印加電圧に対して相互作用力 が極小値になる電圧(古典的意味での探針-試料間の接触電位差)を求めることができる 走査型ケルビン力顕微鏡 (scanning Kelvin probe force microscopy (KPFM)) の開発は 確実に進展した)。理論の立場から、Chen は 早くから相互作用力とトンネル電流の関係 に着目し、相互作用力とトンネル・コンダク タンスがトンネル障壁を介した探針-試料間 の量子力学的共鳴によって密接に関連して いること、即ち、どちらも近接した探針と試 料の波動関数の重なり(正確にはトンネル行 列要素)から求められることを論じた。この 現象に対する議論は現在も多角的に行われ ている。この現象を極言すれば、近接してい く二つの金属物体間の結合力とトンネル電 流の変化は、崩壊していくトンネル障壁を介 して表裏一体の関係にある現象(電子定在波 を作りだしていく状態)の具現であるといえ る。一方、力とコンダクタンスを同時計測す る実験も活発に行われている。微弱な力を検 出できる nc-AFM などの実験技術の進歩とと もに、探針先端原子と試料表面原子の波動関 数の重なりによって生じる量子力学的相互 作用を詳細に解析できる可能性と重要性は 今後ますます高くなることが示唆される。注 意点として、波動関数が確実に重なる距離ま で探針と試料が近づいたとしても、それらの エネルギー準位が異なるとフェルミの黄金 則にみられるようにその二つの電子状態が 共鳴することはない。探針と試料が半導体表 面や分子のように分離・離散した電子状態・ 準位をもつ系で予想されることである。そこ で、本研究で進めてきたように、探針-試料 間に電圧を積極的に印加し、探針と試料のフ ェルミ準位を相対的にシフトさせる。すると、 探針先端と試料の表面準位エネルギーを静 電的にシフトさせて一致させることができ る。元来は異なるエネルギー準位にある探針 先端の波動関数と試料表面の波動関数を共 鳴させる手法 Bias nc-AFM/S はナノ力学的表 面電子分光法として大きな可能性を持つと いえる。ただし、STM が開発された当時から 議論されてきたことではあるが、探針先端の 形状と電子状態評価およびその制御はまだ 不十分な技術である。ナノテクノロジーの一 層の発展を期するためにも、針先という規定 された物体位置への1原子レベルの制御技術 の発展が真に望まれる。

- 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11件)
- H. Tatsumi, <u>A. Sasahara</u> and <u>M. Tomitori</u>: "Lateral distribution of Li atoms at the initial stage of adsorption on TiO₂(110) surface", J. Phys. Chem. C (査読有) (accepted).
- Y. Jeong, M. Hirade, R. Kokawa, H. Yamada, K. Kobayashi, N. Oyabu, T. Arai, <u>A. Sasahara</u> and <u>M. Tomitori</u>: "Local interaction imaging by SiGe quantum dot probe", Current Appl. Phys. (査読有) 12 (2012) 581-584.
- A. Sasahara, C. L. Pang and <u>M. Tomitori</u>: "Atomic scale analysis of ultrathin SiO₂ films prepared on TiO₂(100) surfaces", J. Phys. Chem. C (査読有) **114** (2010) 20189-20194.
- 4. T. Nishimura, A. Itabashi, <u>A. Sasahara,</u> <u>H. Murata</u>, T. Arai and <u>M. Tomitori</u>: "Adsorption state of 4, 4" -diamino*p*-terphenyl through an amino group bound to Si(111)-7x7 surface examined by X-ray photoelectron spectroscopy and scanning tunneling microscopy", J. Phys. Chem. C (査読有) **114** (2010) 11109-11114.
- 5. <u>A. Sasahara</u> and <u>M. Tomitori</u>: "Frequency modulation atomic force microscope observation of TiO₂(110) surfaces in water", J. Vac. Sci. and Technol. B (査読有) **28**(3) (2010) C4C5-C4C10.
- Z.A. Ansari, T. Arai and <u>M. Tomitori</u>: "Low-flux elucidation of initial growth of Ge clusters deposited on Si(111)-7x7 observed by scanning tunneling microscopy", Phys. Rev. B (査読有) 79 (2009) 033302-1 - 033302-4.
- ¹ 直取 正彦、新井 豊子:研究紹介 "走査型 プローブ顕微鏡にみる電圧印加のナノカ 学的相互作用"、表面科学(査読無)29(4) (2008) 239-245.

〔学会発表〕(計62件)

- <u>富取 正彦</u>、実デバイス指向の表面吸着 構造の SPM 解析の試み、日本顕微鏡学会 SPM 分科会 平成 23 年度オープン研究会、 2011 年 12 月 2 日、物質・材料研究機構、 つくば市、茨城.
- 2. T. Arai, T. Ikeshima, Y. Zhang, <u>M.</u> <u>Tomitori</u>, "NC-AFM and force spectroscopy applied to H terminated Si(111)7 \times 7", 14th international conference on NC-AFM 2011, Sept. 19,

2011, Lindau, Germany.

- 3. <u>M. Tomitori</u>, "Nano imaging and characterization using scanning probe microscopy", International Interdisciplinary Science Conference-2010 on Nanobiotechnology: An Interface between Physics and Biology", Dec. 3, 2010, Jamia Millia Islamia, New Delhi, India.
- T. Arai, K. Kiyohara, T. sato, S. Kushida, <u>M. Tomitori</u>, "Surface electron spectroscopy based on nc-AFM with changing bias voltage at close tip-sample separation", ACSIN 10, Sep. 23, 2009, Granada, Spain.
- 5. <u>富取 正彦</u>、走査型プローブ顕微鏡技術 によるナノスケールの物性計測と操作、 日本顕微鏡学会 第52 回シンポジウム、 2008 年 10 月 17 日、千葉大学、千葉.

 <u>富取 正彦</u>、新井 豊子(分担執筆)、共立 出版、重川 秀美、吉村 雅満、河津 璋 編、 実験物理科学シリーズ6 "走査プローブ 顕微鏡「発展編 第10章 非接触 AFM の 展開」"、(2009)、7 ページ、pp. 357-363.

〔産業財産権〕

- ○出願状況(計2件)
- 名称:カンチレバー加熱機構、それを 用いたカンチレバーホルダ、及び、カ ンチレバー加熱方法
 発明者:<u>富取正彦</u>、平出雅人 権利者:北陸先端科学技術大学院大学 種類:PCT 出願 番号:PCT/JP2009/065513 出願年月日:2009年9月4日 国内外の別:国外
- 名称:カンチレバー加熱機構、それを 用いたカンチレバーホルダ、及び、カ ンチレバー加熱方法
 発明者:<u>富取正彦</u>、平出雅人 権利者:北陸先端科学技術大学院大学 種類:特許出願 番号:2010-527834 出願年月日:2011年2月7日 国内外の別:国内

 ○取得状況(計5件)
 1.名称:原子または分子の同定方法 発明者:新井豊子、<u>富取正彦</u> 権利者:北陸先端科学技術大学院大学 種類:特許 番号:4822563 取得年月日:2011年9月16日 国内外の別:国内

- 名称:ポジショニング機構、及び、それを用いた顕微鏡
 発明者:<u>富取正彦</u>、新井豊子、中榮穣 権利者:北陸先端科学技術大学院大学 種類:特許
 番号:4644821
 取得年月日:2010年12月17日
 国内外の別:国内
- 名称:シールド付き細線ケーブル及びその製造方法 発明者:<u>富取正彦</u>、大久保芳彦 権利者:科学技術振興機構、北陸先端科 学技術大学院大学 種類:特許 番号:4822226 取得年月日:2011年9月16日 国内外の別:国内
 名称:試料表面の電子エネルギ準位の測 定方法 発明者:新井豊子、<u>富取正彦</u>
 - 権利者:北陸先端科学技術大学院大学 種類:特許 番号:4576520 取得年月日:2010年9月3日 国内外の別:国内
- 5. 名称:ポジショニング機構、及び、それ を用いた顕微鏡
 発明者:<u>富取正彦</u>、新井豊子、中榮穰 権利者:北陸先端科学技術大学院大学 種類:特許
 番号:US 7,672,048 B2
 取得年月日:2010年3月2日
 国内外の別:米国
- 〔その他〕 ホームページ http://www.jaist.ac.jp/ms/labs/kkk/Tlab /Tlab_home-j.html
- 6.研究組織
 (1)研究代表者 富取 正彦(TOMTITORI MASAHIKO) 北陸先端科学技術大学院大学・マテリアル サイエンス研究科・教授 研究者番号:10188790
 (2)研究分担者 村田 英幸(MURATA HIDEYUKI) 北陸先端科学技術大学院大学・マテリアル サイエンス研究科・教授 研究者番号:10345663
- 笹原 亮 (SASAHARA AKIRA)
 北陸先端科学技術大学院大学・マテリアル
 サイエンス研究科・助教
 研究者番号:40321905
 (3)連携研究者 なし

[〔]図書〕(計1件)