

Title	走査型プローブ顕微鏡にみる電圧印加のナノ力学的相互作用
Author(s)	富取, 正彦; 新井, 豊子
Citation	表面科学, 29(4): 239-245
Issue Date	2008
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/7939
Rights	Copyright (C) 2008 日本表面科学会. 富取正彦、新井豊子, 表面科学, 29(4), 2008, 239-245.
Description	

走査型プローブ顕微鏡にみる電圧印加の ナノ力学的相互作用

富取 正彦¹・新井 豊子^{2,3}¹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 ☎ 923-1292 石川県能美市旭台 1-1²金沢大学大学院自然科学研究科 ☎ 920-1192 石川県金沢市角間町³科学技術振興機構 SORST ☎ 332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8

(2008年1月22日受理)

Nanomechanical Interaction between a Tip and a Sample with Changing Bias Voltage Observed by Using Scanning Probe Microscopy

Masahiko TOMITORI¹ and Toyoko ARAI^{2,3}¹School of Materials Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, 1-1 Asahidai, Nomi, Ishikawa 923-1292²Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192³SORST Japan Science and Technology Agency, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama 332-0012

(Received January 22, 2008)

A novel surface spectroscopic method referred to itself as noncontact atomic force spectroscopy (nc-AFS) is presented, which is based on noncontact atomic force microscopy (nc-AFM) and scanning tunneling spectroscopy (STS) of the family of scanning probe microscopy (SPM). The interaction force and current are measured with sweeping bias voltage between a tip and a sample at a close tip-sample separation, and analyzed in terms of surface spectroscopy. The spectra obtained by the nc-AFS indicate that the resonance states, i. e., covalent bonding, between a Si tip and a Si sample can be formed by tuning the bias voltage, corresponding to the relative shift of energy levels of tip states and sample states. Moreover, the nc-AFS combined with current measurement exhibits potential of evaluating the collapse of tunneling barrier and analyzing the correlation between force interaction and electron conductance between two pieces of condensed matter in proximity.

KEYWORDS : noncontact atomic force microscopy, noncontact atomic force spectroscopy, covalent bonding, bias voltage, silicon

1. はじめに

1980年代に走査型トンネル顕微鏡 (STM: scanning tunneling microscopy)^{1,2)}と原子間力顕微鏡 (AFM: atomic force microscopy)³⁾が登場して以来, その動作原理を応用して多種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 の原理は一見単

純であるが, 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, いまや SPM は最先端の研究・開発は言うに及ばず, 汎用装置の一つとして多方面で活躍している。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理解と制御技術が SPM の助けもあり飛躍的に発展し, 今や材料関連の科学技術は“ナノ”真っ盛りとなった。

現在, SPM の中でも高分解能で絶縁材料をも観察できる AFM がもっとも普及している。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が、微弱な探針-試料間引力を検出できる FM 法⁴⁾を利用した非接触原子間力顕微鏡 (noncontact (nc)-AFM) が開発され、1995 年以降は原子像が再現よく観察されるようになった⁵⁻⁷⁾。ところで、高分解能あるいは原子分解能 SPM 像を得るためには探針先端がナノスケー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 像もそれに依りて変化する。見方を変えれば、探針も一つの“ナノ機能材料”であり、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、また物性を計測できるようにさせ、さらには原子・分子の操作を可能にしているといえる。一方、SPM が描きだしている像あるいは測定の本質は、試料と探針の二つの物体が近接したことによって変化する物理状態量のナノスケールでの 3 次元的空間変化である。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理となっていて、そこで起きている現象を的確に分析することは必ずしも容易ではない。しかし、この「絡み合い」を解きほぐすことは物理的にも興味深く、ナノテクノロジーへの応用の観点からも重要な研究対象である。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と思われる。

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り、静電気力や van der Waals 力といった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のはずである。しかし、起源に基づいて合力を分離・解析することは簡単ではない。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⁸⁾の測定によって行われ、その曲線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な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 (古典的な意味での探針-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⁹⁾の開発は確実に進展した)。しかし、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¹⁰⁾。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) の具現であるともいえる。一方、力とコンダクタンスを同時計測する実験も行われていて¹¹⁻¹³⁾、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は高くなっている。

ところで、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単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・単位をもつ系で予想されることである。そこで我々は、探針と試料を半導体 Si としてその両者間に電圧を印加し、探針と試料のフェルミ単位を相対的にシフトさせることで、探針先端と試料の表面単位エネルギーを静電的にシフトさせて一致させ、元来は異なるエネルギー単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を立案した (Fig. 1)。この着想は、探針-試料間印加電圧を変化させたときに nc-AFM 像の原子コントラストが微妙に変化する観察結果^{14,15)}から得られたものであり、化学結合的相互作用力と印加電圧の関係を確かめるためのものであった。我々は、探針-試料間印加電圧を変化させたときの量子力学的共鳴に基づく相互作用力変化を nc-AFM をベースに計測することで表面単位を調べる力学的分光法を電圧印加非接触原子間力分光法 (nc-AFS: noncontact atomic force spectroscopy) と名付け、そのス

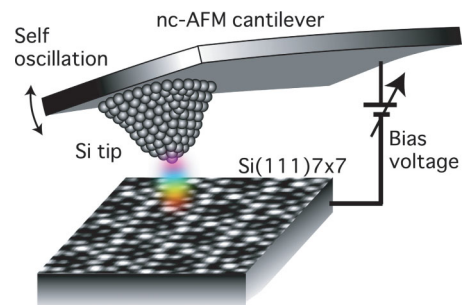


Fig. 1. (color online). Schematic diagram of noncontact atomic force spectroscopy (nc-AFS) with changing bias voltage.

ベクトルを取得し¹⁶⁾, また電流変化も同時測定したので¹⁷⁾紹介する。

2. 実験手法

本実験には自作の室温稼働の超高真空 (UHV) nc-AFM を用いた。力センサーである AFM カンチレバーはピエゾ抵抗型 Si カンチレバー (カンチレバーの曲がり (変位) をカンチレバーの抵抗変化として計測する自己検出型) を用いた。一般に, カンチレバーの変位測定にはレーザー照射による光てこ法や光干渉法などが利用されるが, 自己検出型カンチレバーではレーザー照射は不要である。したがって, 光照射によって探針 (や試料) 内にキャリアを不用意に励起することはない。用いたピエゾ抵抗型カンチレバーにはカンチレバー部および探針先端部に B がドーピングされ, 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。これらの除去のために UHV 中で探針をアルゴンイオンスパッタし, また加熱 (カンチレバーのピエゾ抵抗に直接通電, 600°C 程度) した¹⁸⁾。その評価は走査型オージェ電子分光顕微鏡で行った。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て高分解能 AFM 像観察と分光測定に利用した (Fig. 2: AFM 試料ステージに設置した Si 基板を通電加熱 (約 600°C) し, 接触電流をモニターしながら探針を接触させ, その後ゆっくりと引き上げて単結晶 Si のナノピラーを成長させる¹⁹⁾)。

探針-試料間相互作用力の測定では, AFM カンチレバーをその共振周波数で一定振幅になるように加振し, 相互作用力によるカンチレバーの共振周波数のシフト (Δf) を FM 検波法によって検出する。前述したように, 探針-試料間に働く相互作用力には, van der Waals 力と静電気力などの遠距離力, および化学結合力 (共有結合と金属的凝着力を含む) などの近距離力, さらに近接領

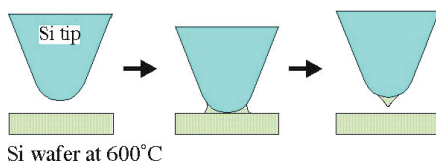


Fig. 2. (color online). Single crystal Si nanopillar growth using a UHV-AFM setup. After bringing the Si tip gently in touch with a heated Si substrate, we retract it slowly in a well-controlled manner.

域で働く斥力などが含まれる。探針-試料間相互作用力 F と計測される Δf には以下の近似関係がある²⁰⁾。

$$\Delta f = \frac{f_0}{2\pi kA} \cdot \int_0^{2\pi} F(z_0 + A \cos \varphi) \cos \varphi \, d\varphi \quad (1)$$

ここで, k : カンチレバーのバネ定数, f_0 : 自由振動時のカンチレバーの共振周波数, A : 振動振幅, z_0 : 探針-試料間の平均距離, である。 Δf は引力領域で探針-試料間距離に対して単調増加する。また, 力を成分に分解したときは各成分に対して (1) 式に基づき加算則が成り立つ。即ち, 探針-試料間に働く全相互作用力 (F_{total}) が静電気力 (F_v), van der Waals 力 (F_{vdw}), 結合力 (F_{bond}), 斥力 (F_{repu}) の合力とするならば ((2) 式), 計測される周波数シフト (Δf_{total}) は, それぞれの力の成分による周波数シフトの加算として表される ((3) 式)。

$$F_{\text{total}} = F_v + F_{\text{vdw}} + F_{\text{bond}} + F_{\text{repu}} \quad (2)$$

$$\Delta f_{\text{total}} = \Delta f_v + \Delta f_{\text{vdw}} + \Delta f_{\text{bond}} + \Delta f_{\text{repu}} \quad (3)$$

本測定では合力が引力であり, 負側への周波数シフト ($-\Delta f$) が大きいことは引力が強いことを意味する。

3. 測定結果

本測定で用いた試料 n 型 Si (111)-7×7 再構成表面²¹⁾ の nc-AFM 像の例を Fig. 3 に示す。個々の明領域がダングリングボンドをもつ Si 吸着原子位置に対応し, 12 個の Si 吸着原子からなる 7×7 単位胞が描きだされている。単位胞内でやや明るい 6 個の原子からなる正三角形の領域が下層に積層欠陥をもつ半単位胞である (やや暗い正三角形領域が非積層欠陥半単位胞)。この半単位胞間の明暗の差は, 積層欠陥半単位胞内 Si 吸着原子上で探針との間に働く引力が非積層欠陥半単位胞内 Si 吸着原子上より強いことを意味し, 電子密度・状態の差異が結合力の違いを生んでいると推察される。

nc-AFS スペクトル測定は, STM に基づいて開発された走査型トンネル分光法 (STS: scanning tunneling spec-

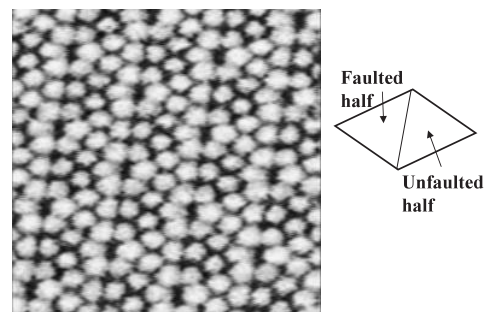


Fig. 3. nc-AFM image of Si(111)-7×7 at a sample bias voltage of -0.5 V. Scanning area: about 12 nm × 12 nm.

troscopy) である CITS (current imaging tunneling spectroscopy) 法²²⁾を模倣した。具体的には、nc-AFM 画像を取得しつつ、あらかじめ設定した位置で間欠的に探針の走査を止め、探針-試料間距離の制御用フィードバック回路もホールド状態にして、即ち探針と試料の相対的位置関係を固定したうえで、探針-試料間印加電圧を掃引して共振周波数変化 ($-\Delta f$) を計測した。Si(111)-7×7 表面を試料として、nc-AFM 像を観察し、振動している探針先端-試料表面間の最接近距離を 1.5, 0.43, 0.33, 0.3 nm (注: 相対的な接近変化量の確度は高いが、絶対値は概算値) と近づけつつ、多数点 (Fig. 3 の約 1/4 に対応する面積で $16 \times 16 = 256$ 点) で nc-AFS スペクトル ($-\Delta f$ - V 曲線) を一気に取得した。各距離で取得したスペクトルの一部を Fig. 4 に示す (上列が Si 吸着原子上, 下列が Si 吸着原子・Si レスト原子がない領域 (表面 Si 原子がない領域) に対応)。

探針が試料面から 1.5 nm 以上離れているときはすべての測定点で、相互作用力は接触電位差 ($V_c = -0.27$ V) に相当する印加電圧で極小値を取り、印加電圧の増大とともに二次関数的に強くなった。この振舞いは静電気力を起源とした引力に現れる典型的な現象である ($-\Delta f \propto (V - V_c)^2$)。一方、探針-試料間距離を 0.43 nm に接近させると、すべての測定点で 0 V 近傍にやや幅広なピークが出現した。さらに 0.33, 0.30 nm と近づけると、複数の測定点で 0 V 近傍のピークが非対称的に鋭くなった。Fig. 5 (a) に、Si(111)-7×7 表面の積層欠陥半単位胞 Si 吸着原子上で得られた nc-AFM スペクトルの探針-試料間距離に対する依存性を示す。この関係を基

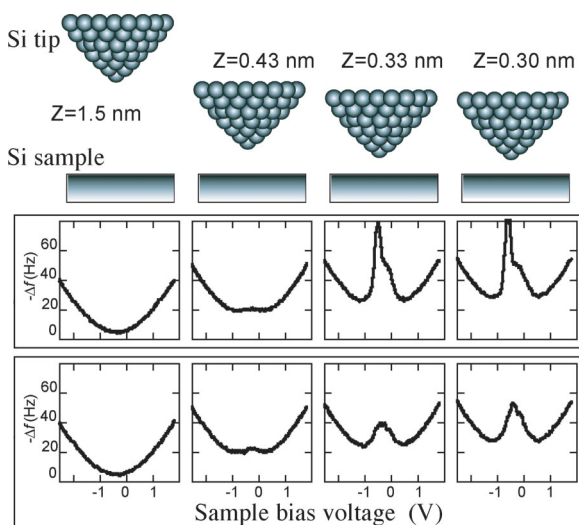


Fig. 4. (color online). Typical examples of nc-AFS spectra over Si(111)-7×7. Upper row shows spectra over a Si adatom, and lower over no Si surface atoms, i.e., no Si adatoms neither Si rest atoms.

に、探針-試料間距離・印加電圧・相互作用力 ($-\Delta f$) の関係を 3次元プロットとして Fig. 5 (b) に描いた。

ここで得られた nc-AFS スペクトルを数値的に解析してみた。各スペクトルから遠距離相互作用である静電気引力 ($(V - V_c)^2$ の項) と van der Waals 力 (探針-試料間距離の逆べき乗に比例する項。nc-AFM スペクトルの最小値 (静電気引力がゼロのとき ($V = V_c$)) に対応) の寄与を差し引き、近距離相互作用の寄与のみをピーク曲線 (近距離相互作用スペクトル) として抽出した。さらに、この曲線が複数のガウス型曲線が重なっていると仮定して複数のピークに分離してみた。その結果、試料表面上のすべての測定点でほぼ同じピーク (中央値 = -0.27 eV, 半値幅 = 約 0.35 eV, ブロード・ピークと呼ぶ) が見いだされ、探針-試料間距離 0.33 nm のときは、そのピークの他に表面 Si 原子上では特定電圧で非常に鋭いピーク (半値半幅: 約 0.1 eV, シャープ・ピークと呼ぶ) が見いだされた。シャープ・ピークの中央値は各

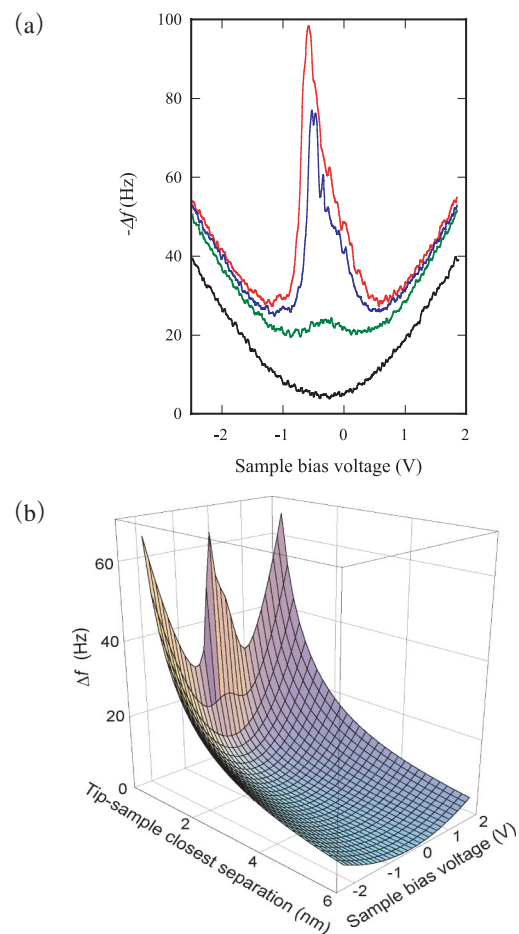


Fig. 5. (color online). (a) Change of nc-AFM spectra over a Si adatom with decreasing tip-sample closest separation from 1.5, 0.43, 0.33 to 0.30 nm. (b) Surface plots of $-\Delta f$ versus sample bias voltage and tip-sample closest separation.

原子サイトにより若干異なっていた (Si 吸着原子上ではフェルミ準位より -0.4 eV, 積層欠陥半単位胞内の Si レスト原子上では -1.0 eV でピーク)。これらの値は, 光電子分光・トンネル分光法や密度汎関数法によって求められた Si(111)- 7×7 表面の各 Si 原子の電子エネルギー準位によく一致し^{23, 24)}, 以下に議論するように探針と試料間の化学 (共有) 結合に起因していると考えられる。また, -0.2 V から $+0.8$ V の範囲に小さな複数のピークも検出しているが, 詳細はまだ未確定である。

一方, 測定系を改良して nc-AFS スペクトルと同時に電流-電圧 (I - V) 特性も測定した。ただし, AFM カンチレバーは常にその共振周波数で振動 (この測定では $f_0 = 167$ kHz, $A = 15$ nm) しているため電流もその周波数で変動する。計測に用いた電流アンプの帯域は数 kHz なので, 測定電流はカンチレバー振動の 1 周期あたりの平均値となる。電流がトンネル電流と同じ探針-試料間距離特性をもつとすると, 平均電流値は探針と試料が最接近したときに流れる電流の 5% 弱と推量される²⁵⁾。Fig. 6 に測定結果を示す。nc-AFS スペクトルは, Fig. 5 の結果と同様に接近時にすべての領域でブロード・ピーク, Si 吸着原子上でシャープ・ピークを示した。一方, 同時測定した電流は, Si 吸着原子上でシャープ・ピークが現れる印加電圧で接近時 (0.5 nm) にわずかに検出され, さらに接近 (0.4 nm) するとシャープ・ピークとともに急峻に増大した。このピーク電流は 1 nA 以下であるが, 前述の計算によると振動している探針が試料に最接近したときには 20 nA 程度の電流が流れていることになる。この程度の電流の場合, トンネル障壁の崩壊が始まって障壁高さが低下し, 純粋なトンネル過程からバ

リスティック伝導に移行し始めている可能性がある。この印加電圧での探針-試料間距離に対する電流変化を測定すると, 見かけ上のトンネル障壁高さは低下していた。これは実際のトンネル障壁高さがかなり消失していることを意味し²⁶⁾, 探針が接近して探針と試料の表面間に強い引力が働くときに両者間には電子伝導チャンネルが開いていることを示唆する。この I - V 特性には通常の STS で測定されるようなトンネル電流-印加電圧特性も含まれているはずであるが, 前述したように振動している探針と試料間の電流の検出感度はかなり低下するので検出できなかったと推定している。

4. 印加電圧に依存する相互作用力の考察

固体同士の結合形成を考える場合, 通常の孤立分子系の結合過程と大きく異なる点がある。当然であるが, それは両者間に電位差を与えられる点である。電位差を印加すれば 2 物体のフェルミ準位は静電的・相対的にシフトする。そこで, nc-AFS の結果を考察するためのエネルギーダイアグラムを Fig. 7 に示す。試料は Si(111)- 7×7 再配列表面 (n 型, バンドギャップ: 1.1 eV) で表面伝導は金属的である (表面 Si 原子のダングリングボンド 1 本に平均 1 個の電子が存在)。Si 探針の電子状態は不明であるが, 探針が [001] 方位の単結晶 Si (B ドープ p 型) であるので, 先端は Si ダイマーからなる Si (001)-c(4×2) 再配列構造で表面エネルギーギャップ (約 0.8 eV) をもつと仮定する。探針と試料が 1 nm 以上離れていて 0 V 印加の場合 (a), 接触電位差によって電界が真空ギャップ内で発生する効果と鏡映力の効果を考慮して, 真空ギャップ内の静電ポテンシャルは中央が傾

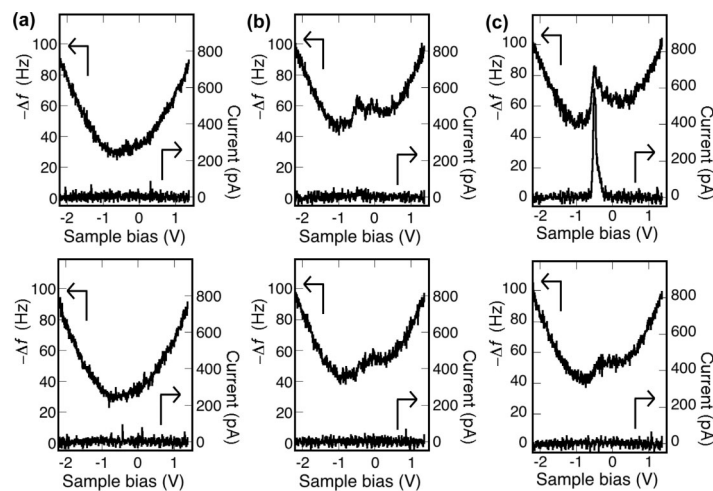


Fig. 6. Simultaneous measurements of $-\Delta f$ with average current versus sample bias voltage at tip-sample separations of (a) 0.9, (b) 0.5 and (c) 0.4 nm, respectively. Upper row shows over a Si adatom, and lower over no Si surface atoms.

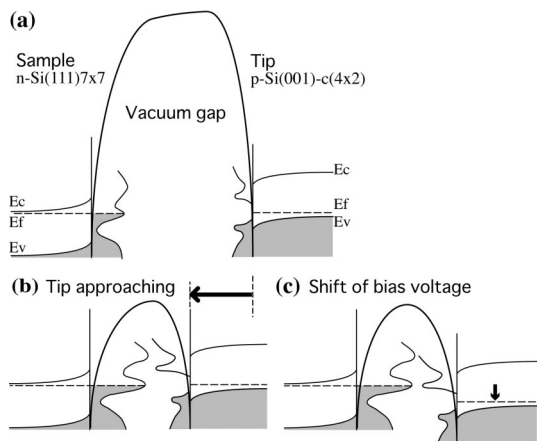


Fig. 7. Energy diagram of a sample of n-Si(111)-7×7 and a tip of p-Si(001)-c(4×2) in a proximity. (a) At a wide separation at 0 V. (b) Tip approaching at 0 V. (c) Shift of bias voltage tuning of the sample states to the tip states, resulting in resonance states.

いた曲線として描ける。次に探針が試料に 1 nm 以下に接近すると、両者に由来した静電ポテンシャルの重ね合わせの効果でトンネル障壁が崩壊し始め、トンネル電流は急激に増大する。さらに接近すると (b)、試料と探針の波動関数の空間的重なりは大きくなる。ここで試料-探針間印加電圧を変化させる (c)。試料側のおもに表面 Si 吸着原子に起因するダングリングボンドと探針側の空準位 (探針先端の Si ダイマーのうちバックリング・ダウンした Si の表面電子状態) のエネルギーが一致し始め、両者の軌道混成によって電子系エネルギーが得となり共有結合が生じる。この結合形成の印加電圧依存性が nc-AFS で捉えたシャープ・ピークであると推定でき、また、この軌道混成が電子伝導チャネルを形成したと考えられる。このとき探針側に正の電圧を印加しているので、探針先端の Si ダイマーのバックリング・ダウン (空準位) した Si 原子は、負に印加された試料側に引っ張られバックリングが弱まり対称ダイマーに近づいている可能性がある。Si 対称ダイマーの場合、エネルギーギャップは消失することが知られている。したがって、探針側の Si ダイマーによる表面エネルギーギャップは探針側への正電圧印加によって小さくなり、結果として、試料のダングリングボンドの電子状態とエネルギー的に重なる印加電圧範囲は小さくなるであろう。このような効果を含め鋭いピークが捉えられたと考えている。

次に、試料表面上のすべての測定点で検出されたブロード・ピークを考える。このピークはシャープ・ピークに比べてやや離れた探針-試料間距離 (約 0.5 nm) から検出され始めた。探針が試料に接近してトンネル障壁の

高さや幅が減ると、電子はトンネル抜けしやすくなり探針と試料の電子は双方に帰属されるようになる。例えば、試料から探針へトンネルした電子は探針表面の原子ポテンシャルで散乱され、一部はそのまま進行し、残りは後方散乱されその一部は試料側に再度トンネルし、さらにはその一部が後方散乱され探針側へまたトンネルするであろう。このような障壁の低減・狭小化によって増加する探針-試料表面間の電子散乱は、トンネル障壁を挟んだ一つの定在波を形成し得る。真空を挟んだ二つのマフィンティン・ポテンシャルの間でトンネル障壁が消失することによって形成されていく金属結合への移行であるとも解釈できる。印加電圧が高くなると、トンネル抜けした電子はバリスティックに表面より内部まで進行し、表面近傍の原子ポテンシャルの散乱を受けにくくなる。したがって、低減・狭小化したトンネル障壁を挟んだ探針-試料間に広がる共鳴的電子状態を形成しにくくなる。その結果、nc-AFM スペクトルは接触電位差が補償される印加電圧 (本測定で約 -0.27 V、トンネル障壁の中央で真空準位の傾きが水平になり、探針と試料に対してその傾きが対称的なトンネル障壁となる電圧) のときを中心としてブロード・ピークが観察されると解釈できる。また、孤立した Si 原子同士が接近するときの s, p 軌道の混成を考えると、接近によって縮退が解けていくときの p 軌道に含まれる電子系のエネルギー低下は金属結合的であり、さらに接近したときの sp 混成は半導体としての共有結合状態であると表現できる。即ち、金属的結合は共有結合が形成されるより遠方で出現するわけで、本測定で捉えられたピークの距離依存性と対応している。

5. ま と め

印加電圧を変化させて各原子位置での相互作用力を評価する新しいナノ力学的表面電子分光法 nc-AFS を紹介した。ここで示した結果は、二つの凝縮系物体を極接近させ印加電圧を変化させて静電エネルギー的にチューニングすることで、それぞれの表面電子準位からなる共鳴状態 (共有結合) を形成できることを示している。本手法では電流も同時計測できるので、近接した凝縮系物体間のトンネル障壁の崩壊過程と相互作用力の相関に新しい知見をもたらすことや、二つの電極に挟まれた分子系の結合形成や電流-電圧特性の評価への応用が期待できる。また、nc-AFM は絶縁部を含んだ材料・デバイスにも適用できるので、静電ポテンシャル変化をその試料の境界条件に基づき巧みに利用すれば、nc-AFS も幅広い材料・デバイスに適用できる可能性をもつ。ただし、超高分解能走査電子顕微鏡と SPM を複合化した観察によ

ると、対象試料がナノ粒子などの場合、静電的な効果によって探針と試料間でナノ粒子の飛翔が偶発的に起こる場合がある。近接物体間の相互作用を理解するには、構造的な配位も含めて多角的で慎重な検討が必要であることは忘れずに指摘しておきたい。

文 献

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel : Phys. Rev. Lett. **49**, 57 (1982).
- 2) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel : Phys. Rev. Lett. **50**, 120 (1983).
- 3) G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber : Phys. Rev. Lett. **56**, 930 (1986).
- 4) T.R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne and D. Rugar : J. Appl. Phys. **69**, 668 (1991).
- 5) F.J. Giessibl : Science **267**, 68 (1995).
- 6) S. Kitamura and M. Iwatsuki : Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L145 (1995).
- 7) H. Ueyama, M. Ohta, Y. Sugawara and S. Morita : Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L1086 (1995).
- 8) B. Cappella and G. Dietler : Surf. Sci. Rep. **34**, 1 (1999).
- 9) M. Nonnenmacher, M.P. O' Boyle and H.K. Wickramasinghe : Appl. Phys. Lett. **58**, 2921 (1991).
- 10) C.J. Chen : "Introduction to Scanning Tunneling Microscopy, second edition" (Oxford University Press, Oxford, 2008) p. 123.
- 11) U. Dürig, O. Züger and D.W. Pohl : J. Microscopy **152**, 259 (1989).
- 12) Ch. Loppacher, M. Bammerlin, M. Guggisberg, S. Schär, R. Bennewitz, A. Baratoff, E. Meyer and H.-J. Güntherodt : Phys. Rev. B **62**, 16944 (2000).
- 13) A. Schirmeisen, G. Cross, A. Stalder, P. Grütter and U. Dürig : New J. Phys. **2**, 29 (2000).
- 14) T. Arai and M. Tomitori : Appl. Surf. Sci. **157**, 207 (2000).
- 15) T. Arai and M. Tomitori : "Noncontact Atomic Force Microscopy", ed. by S. Morita, R. Wiesendanger and E. Meyer (Springer, Berlin, Heidelberg, 2002) p. 79.
- 16) T. Arai and M. Tomitori : Phys. Rev. Lett. **93**, 256101 (2004).
- 17) T. Arai and M. Tomitori : Phys. Rev. B **73**, 073307 (2006).
- 18) T. Arai and M. Tomitori : Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 **36**, 3855 (1997).
- 19) T. Arai and M. Tomitori : Appl. Phys. Lett. **86**, 073110 (2005).
- 20) F.J. Giessibl : Phys. Rev. B **56**, 16010 (1997).
- 21) K. Takayanagi, Y. Tanishiro, M. Takahashi and S. Takahashi : J. Vac. Sci. Technol. A **3**, 1502 (1985).
- 22) R.J. Hamers, R.M. Tromp and J.E. Demuth : Surf. Sci. **181**, 346 (1987).
- 23) Ph. Avouris, I.W. Iyo and F. Bozso : J. Vac. Sci. Technol. B **9**, 424 (1991).
- 24) M. Fujita, H. Nagayoshi and A. Yoshimori : Surf. Sci. **242**, 229 (1991).
- 25) T. Arai and M. Tomitori : Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 3753 (2000).
- 26) N. Kobayashi, K. Hirose and M. Tsukada : Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 3710 (1996).