

超高真空 SPM による原子レベルの電位像観察

北村真一・鈴木克之・岩槻正志

日本電子株式会社 ☎ 196-8558 東京都昭島市武蔵野 3-1-2

(2001 年 2 月 20 日受理)

Atomic-scale Potential Imaging by Ultrahigh Vacuum Scanning Probe Microscopy

Shin-ichi KITAMURA, Katsuyuki SUZUKI and Masashi IWATSUKI

JEOL LTD.

1-2 Musashino, 3-Chome, Akishima, Tokyo 196-8558

(Received February 20, 2001)

The contact potential difference (CPD) imaging of Ag- and Au-deposited Si(111) 7×7 surfaces and the effect of CPD distribution on NC-AFM data are discussed. Scanning Kelvin probe force microscopy (SKPM) based on the measurement of electrostatic force gradient was applied under an ultrahigh vacuum (UHV) to acquire the data. The CPD images of Ag- and Au-deposited Si(111) 7×7 surfaces are virtually identical, irrespective of the deposited metals. Detailed analysis has revealed that the CPD images showing the atomically resolved potential difference, does not represent the intrinsic work function of the materials but reflects the local electron density on the surface. On the other hand, the average potential that corresponds to the DC level of the CPD image is considered to reflect the work function on the surface.

1. は じ め に

走査ケルビンプローブフォース顕微鏡 (SKPM: Scanning Kelvin Probe Force Microscope) は、走査トンネル顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) に代表される走査プローブ顕微鏡 (SPM) の一種であり、ノンコンタクト AFM (NC-AFM) から派生したものである。SKPM では探針と試料の仕事関数の差に起因して生じる接触電位差 (CPD) を測定することができる。したがって、仕事関数が既知の探針を用いた SKPM 測定では、試料表面の仕事関数を算出することができる。仕事関数は元素や結晶方位の違いによって異なるため、試料表面上にそのような違いがあった場合には、試料表面の横方向の仕事関数の分布が CPD 像として画像化される。更に、絶縁物表面の帯電による電位分布の違いも観察することができる。

SKPM による CPD 像観察に関する報告はいくつかあ

るが、そのほとんどは大気圧中のものである¹⁻⁴⁾。しかし、仕事関数は表面の酸化や吸着に対して敏感であるから、清浄表面の仕事関数や吸着等の表面処理による仕事関数の変化を正確に測定するためには、環境として超高真空 (UHV) が望ましい。また、絶縁体の表面に電荷が帯電している場合、UHV 環境はその放電を妨ぐためにも効果的なため、機械的なストレス等により生じる帯電現象も容易に観察することができる。

UHV 環境下での NC-AFM を UHV NC-AFM と呼ぶが、この UHV NC-AFM は原子分解能を持つことが実証されて以来⁵⁻⁷⁾、原子レベルの観察が無機物、有機物を問わず盛んに行われるようになった。UHV NC-AFM による原子像観察では、比較的堅いカンチレバー (バネ定数 $> 数 \text{ N/m}$) が使用されており、探針が試料に吸引されることなく STM 観察時と同程度に探針を試料に近づけることができる。そうしたときは、探針-試料間に生じる力を直接カンチレバーのたわみとして検出するよりは、むしろ探針-試料間に生じる力の勾配を検出する方が原子サイズの領域では効果的であり⁸⁾、結果として高

E-mail: kitamura@jeol.co.jp

分解能像が得られる。探針-試料間に生じる力の勾配はカンチレバーの固有振動数の変化として検出される。探針-試料間に生じる静電気力をカンチレバーのたわみとして検出する一般的な SKPM では、CPD 像と同時に観察される NC-AFM 像（凹凸像）ですら原子レベルの分解能に達していない。ところが UHV NC-AFM と同様に探針-試料間に生じる静電気力の勾配を検出する SKPM では、凹凸像だけでなく CPD 像も原子レベルの空間分解能が得られている⁹⁻¹²。

探針-試料間に電位差 U が生じた場合、その間に働く静電気力は次式で表される。

$$F = -(1/2)U^2 \partial C / \partial Z \quad (1)$$

ここで、 C は探針-試料間の静電容量、 Z は探針-試料間の距離である。また、その力の勾配は、

$$\partial F / \partial Z = -(1/2)U^2 \partial^2 C / \partial Z^2 \quad (2)$$

で、(1) 式と同様に探針-試料間の電位差 U の二乗に比例している。このことは、一般的な SKPM における静電気力の検出の代わりに、その力の勾配を検出しても探針-試料間の電位差 U を算出できることを意味している。

本稿では、通常の UHV NC-AFM 観察に及ぼす CPD の影響、および静電気力の勾配を検出する手法を用いた UHV SKPM による金属を吸着させた S(111) 7×7 表面構造の原子レベルでの電位像観察^{9,12}について紹介する。

2. SKPM の原理

探針-試料間に電圧を印加した場合に生じるそれぞれの表面電位の変化の模式図を Fig. 1 に示す。ここでは、試料表面の仕事関数 ϕ_s が探針の仕事関数 ϕ_T より大きい場合を考えている。Fig. 1 (a) のように、探針-試料間に電圧を印加せずにショートさせた場合（これは探針先端以外のところが試料に接触している状態と同じである）、探針と試料のフェルミレベル E_F が一致することになり、探針-試料間にその仕事関数の差 $\Delta\phi$ ($\Delta\phi/q$ が CPD である： q は電子の電荷)に相当する静電気力が生じる。一方、Fig. 1 (b) のように探針-試料間に仕事関数の差に相当する電圧 $V_{DC} = \Delta\phi/q$ を印加した場合には、真空レベル E_V が一致して探針-試料間には静電気力が生じないことになる。接地された試料 ($V_{Sample} = 0$ V) に対して探針電圧 V_{Tip} を変化させたときの探針-試料間の静電気力の勾配 $\partial F_E / \partial Z$ の変化は Fig. 2 (a) に示すような二次曲線を描く。探針電圧 V_{Tip} として $V_{DC} + V_{AC} \sin(\omega t)$ のような直流成分に交流成分を重ねた電圧を探針に印加した場合、図に示すように力の勾配 $\partial F_E / \partial Z$ が変調される。探針-試料間の CPD を $\Delta\phi/q$ として、その力の勾配を数式で表すと次式のようなになる。

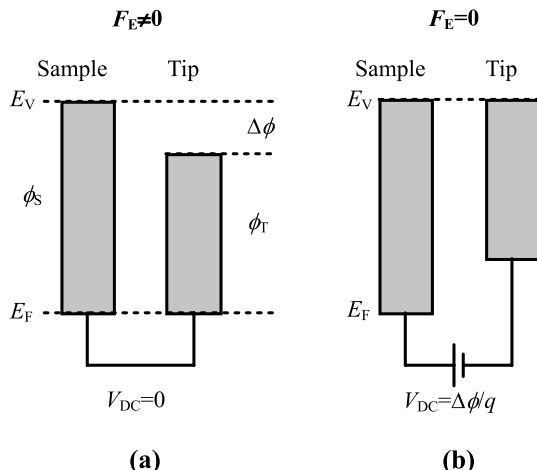


Fig. 1 Schematic diagram of electrical potential variation with voltage applied between the tip and sample. (a) When $V_{DC} = 0$ an electrostatic force corresponding to the work function difference between the tip and sample $\Delta\phi$ acts between the tip and sample. (b) When $V_{DC} = \Delta\phi/q$ (q : charge) is applied between the tip and sample, no electrostatic force acts.

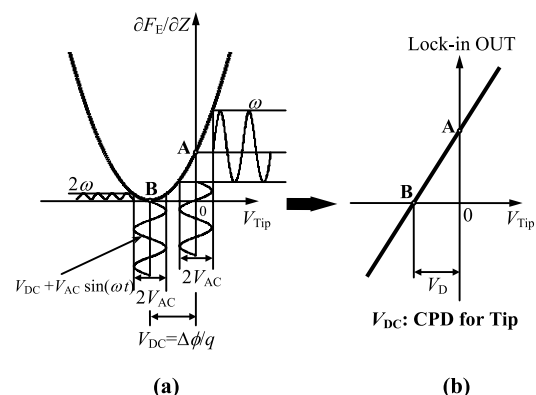


Fig. 2 (a) Schematic illustration of the tip voltage dependence of the frequency shift for a grounded sample. The tip voltage oscillation is $V_{Tip} = V_{DC} + V_{AC} \sin(\omega t)$. When the $V_{DC} = \Delta\phi/q$, the signal of force gradient has a period of 2ω , and when $V_{DC} \neq \Delta\phi/q$, ω component appears as a modulation by the oscillation of tip voltage. (b) When the amplitude of ω component is detected by the use of lock-in amplifier, the output of the lock-in amplifier becomes zero at $V_{DC} = \Delta\phi/q$, and it corresponds to CPD between the tip and sample.

$$\begin{aligned} \partial F / \partial Z = & -(1/2) [(V_{DC} - \Delta\phi/q)^2 + (1/2)V_{AC}^2] \partial^2 C / \\ & \partial Z^2 - (V_{DC} - \Delta\phi/q) V_{AC} \sin(\omega t) \partial^2 C / \partial Z^2 \\ & + (1/4) V_{AC}^2 \cos(2\omega t) \partial^2 C / \partial Z^2 \end{aligned} \quad (3)$$

もし、 $V_{DC} = \Delta\phi/q$ であるならば (3) 式の第二項がゼロとなり力の勾配は 2ω 成分で変調される (B 点) が、それ以外の電圧では力の勾配に第二項の ω 成分の変調が現れる (A 点)。この ω 成分の振幅はロックインアンプを用いることにより精度良く検出することができ、その出力は V_{Tip} による一次微分値に相当する直線的な変化となる (Fig. 2 (b))。したがって、 $V_{DC} = \Delta\phi/q$ でその出力はゼロとなり、その V_{DC} が探針-試料間の CPD に相当することになる。

CPD 像は、ロックインアンプの出力がゼロを維持するようにフィードバック制御されることにより得られる。また、静電気力の勾配は、実際にはカンチレバーの固有振動数の周波数シフトとして検出されている。

ロックインアンプの出力をゼロに維持するフィードバックをせずに、 V_{DC} を固定してロックインアンプの出力を直接画像化しても相対的には同様な CPD 像が得られ、Fig. 2 (b) の直線に相当する傾きを測定することにより CPD 値に換算できる。しかし、これは (2) 式の $\partial^2 C / \partial Z^2$ が一定 (Fig. 2 (b) の直線の傾きが一定) と仮定した場合であり、金属以外では、厳密には物質によってその値が異なる。また、探針-試料間距離のずれによっても値が異なる。

3. 実験装置

今回使用した装置の信号の流れを Fig. 3 に示す。図中破線の信号の流れが FM 検出法を用いた NC-AFM による凹凸像観察に相当する部分であり⁸⁾、実線が CPD 像観

察のために追加された部分である。

NC-AFM 観察では、探針-試料間の力の勾配をカンチレバーの固有振動数の変化として検出している。カンチレバーの固有振動数 f_0 とそのバネ定数 k との間には $f_0 \propto \sqrt{k}$ の関係があり、探針を試料に近づけて探針-試料間に $\partial F / \partial Z$ の力の勾配が生じると、その関係は $f_0 \propto \sqrt{k + \partial F / \partial Z}$ になる。NC-AFM は一般的には引力領域を用いているので、 $\partial F / \partial Z$ は負となり、カンチレバーの固有振動数は小さくなる方向に変化する。この固有振動数を検出するため、カンチレバーはその固有振動数での発振を維持している。Fig. 3 に示すように、本実験では、

光てこ方式により検出されたカンチレバーの変位信号が、プリアンプ、バンドパスフィルター、フェーズシフター等を経てカンチレバー加振用の piezo 素子 (PZT) に戻る正帰還ループ回路が組まれており、正帰還発振によりカンチレバーの固有振動数での発振が維持されている。その発振周波数は、PLL を使用した FM デモジュレータにより周波数/電圧変換され、誤差アンプ 1 (Error AMP 1) に入力される。誤差アンプ 1 では、参照電圧 (Ref. V) によって設定される周波数のシフト量を一定に保持するように、探針-試料間距離を制御するための Z piezo 制御電圧を出力する (フィードバック 1)。

カンチレバーの固有振動数は探針-試料間の静電気力によってもシフトする。導電性カンチレバーにオシレーター (Osc.) および誤差アンプ 2 (Error AMP 2) からの電圧 $[V_{DC} + V_{AC} \sin(\omega t)]$ を印加した場合、接地された試料と探針間に電位差が生じ静電気力が作用する。印加

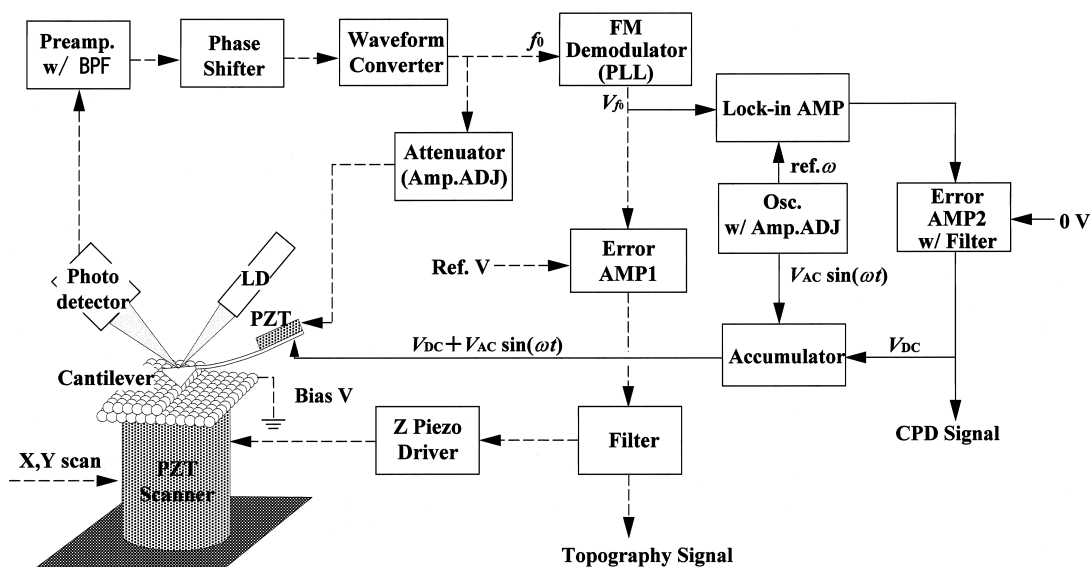


Fig. 3 Block diagram of the NC-AFM system and the CPD measurement system.

電圧の交流成分の周波数が FM ディモジュレーターの動作帯域内であり、且つフィードバック 1 の帯域を越えた値（追従できない値）に設定されれば、FM ディモジュレーターの出力 (V_0) にその交流成分による変調が現れる。この信号をロックインアンプで、 ω を参照信号として検出すると、上述 (2. SKPM の原理) のように ω 成分の振幅に相当する出力が得られる。この出力がゼロのとき探針-試料間の静電気が最小となり、この状態を維持するような直流電圧 (V_{DC}) が誤差アンプ 2 から加算器を経て探針の電位としてフィードバックされる (フィードバック 2)。この V_{DC} が探針に対する試料表面の CPD であり、試料表面の凹凸信号と同時に表示することで NC-AFM 像と CPD 像が同時観察される。

試料表面内での CPD の違いを測定する方法としては、上述の SKPM 以外に、Fig. 4 に示すような周波数シフトの探針電圧依存性カーブを測定し、そのカーブから求める方法がある。この測定は、STM における I-V や CITS (Current Imaging Tunneling Spectroscopy) 測定に相当するもので、具体的には探針-試料間距離を一定に保持した状態で探針のバイアス電圧を変化させ、そのときの周波数シフトを測定する (Fig. 2 (a) の $\partial F_E / \partial Z$ - V カーブ測定に相当)。

本実験には、JEOL 製 UHV SPM (JSPM-4500 A) を使用しており⁹⁾、すべてのデータは 1×10^{-8} Pa 以下の圧力下で収集されている。使用したカンチレバーは市販の Si

カンチレバーであり、その固有振動数およびバネ定数はそれぞれ 300 kHz および 50 N/m 前後である。SKPM 観察では、接地された試料に対して、探針に周波数 1 または 2 kHz、振幅 $2 V_{F-P}$ 前後の交流電圧を印加しており、得られる CPD の値は試料接地とした探針電位である。観察中のスキャンスピードは 1.7 s/line であり、試料への金属蒸着は in-situ で行っている。

4. 観 察 結 果

4.1 NC-AFM 観察に及ぼす CPD の影響

Fig. 5 は、探針に印加するバイアス電圧を変化させたときの、ほぼ同視野の NC-AFM 像の変化を示したものであり、それぞれの電圧は (a) -1 V, (b) 0 V, (c) 1 V である。試料は、n 型の Si (111) 7×7 表面に Au を蒸着後、アニールすることで形成される 7×7 構造と Au を含む 5×2 構造が共存する表面であり、スキャンサイズは $50 \times 50 \text{ nm}^2$ である。図中、矢印は同じキंकを示している。図からわかるように (a) と (c) では、 7×7 領域と 5×2 領域のコントラストが反転している。

この違いを明瞭にするために、Fig. 5 中に示した位置で計測したラインプロファイルを Fig. 6 に示す。このプロファイルは、それぞれの画像において 5×2 領域が平均的に水平になる (同じ輝度になる) ような処理が施された後に測定している。図からわかるように、探針電圧 V_T が 1 V では 5×2 領域が盛り上がり、逆に -1

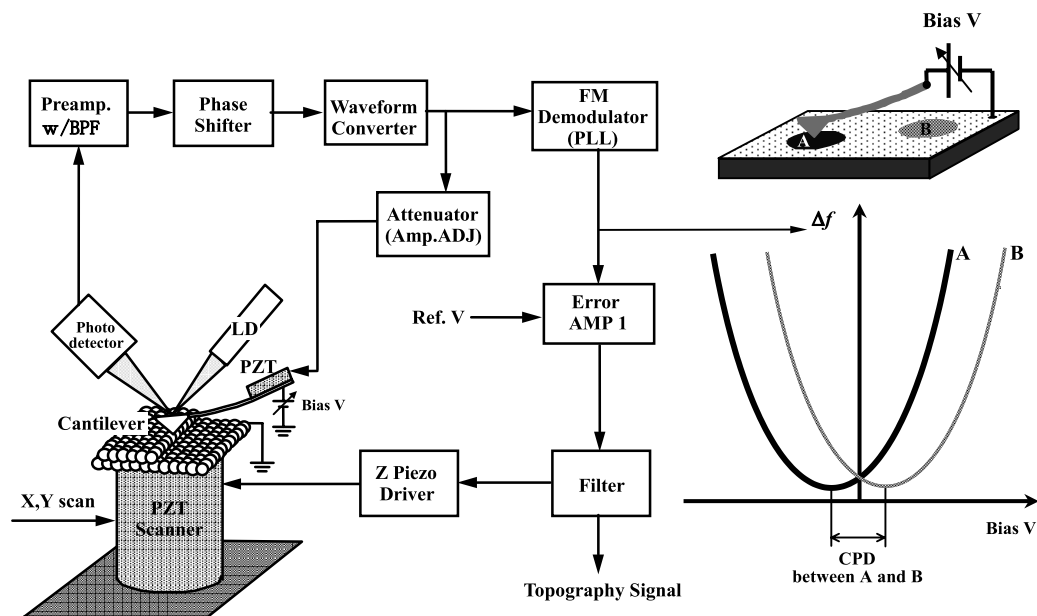


Fig. 4 Another method of CPD measurement without SKPM function. CPD is obtained from the bias voltage dependence curve of frequency shift.

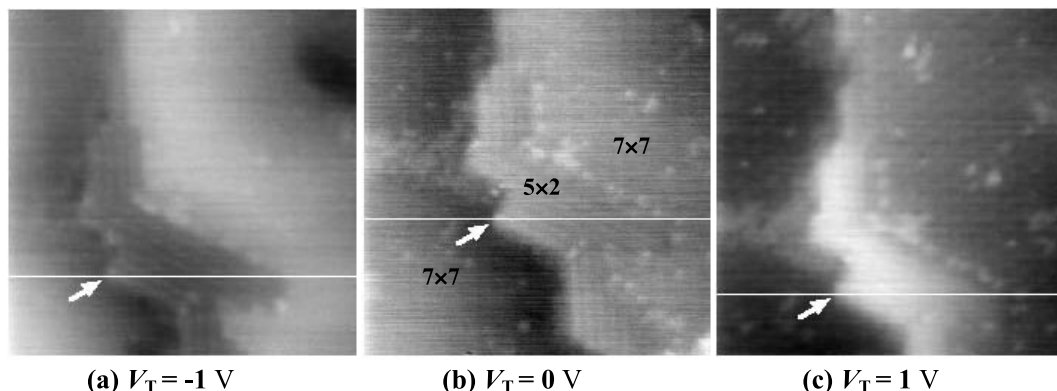


Fig. 5 Change of NC-AFM images when the bias voltage applied to the tip was changed.

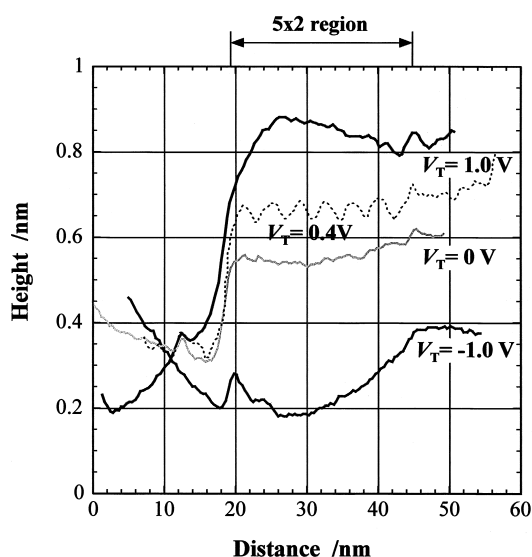


Fig. 6 Line profiles of NC-AFM images of Au/n-Si(111) 7×7 - 5×2 in Fig. 5.

Vでは凹んでいることがわかる。また0 Vでは、画像では判別しがたいが、若干ではあるが-1 Vの場合と同様に凹んでおり、ステップの高さは格子定数から求められる0.31 nmより小さく測定されている。

このように NC-AFM 像において探針-試料間の電位を0 V (探針と試料が同電位) にしても幾何学的な表面形状を反映しないことがある。これは各領域の探針に対するCPDが異なるため生じたものと考えられる。そこで 7×7 および 5×2 領域の探針に対するCPDを評価するため、各領域における周波数シフトの探針バイアス電圧依存性を測定した。Fig. 7は、Fig. 4に示した方法で画像の各画素毎にバイアス依存性カーブを測定し、図中の画像に四角い枠で示した領域の平均のカーブを抽出した

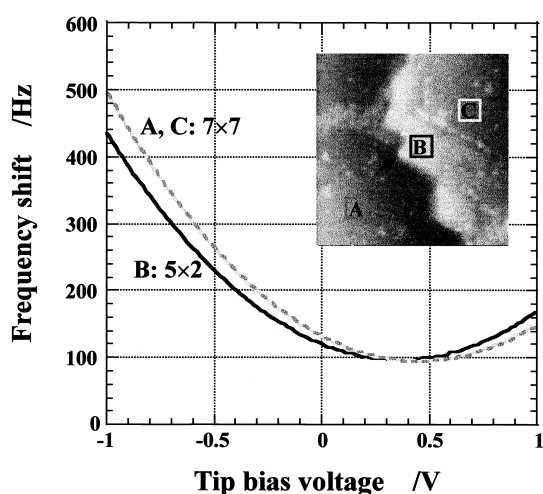


Fig. 7 Frequency shift of bias voltage dependence curves on the 7×7 and 5×2 structure on the Au/n-Si(111) surface.

結果である。平均的には探針電圧が約0.4 Vで 7×7 および 5×2 領域の静電気が最小となることがわかる。また 7×7 領域においては上側のテラスと下側のテラスとではそのカーブは一致しており、 5×2 領域とのCPDはそれぞれの極小点の差から約0.1 Vであることがわかる。仕事関数で表現すると 5×2 領域の方が 7×7 領域より約0.1 eV大きいことになり、探針の仕事関数はそれより更に大きいことになる。Fig. 8は、平均的に静電気の影響が最小となる0.4 Vの探針電圧で観察した結果である。また図中に示された位置におけるラインプロファイルはFig. 6に破線で示してある。このプロファイルを見る限りにおいては、平均的に静電気の影響が最小となるバイアス電圧において、より正確な幾何学的表面形状を反映していることがわかる。

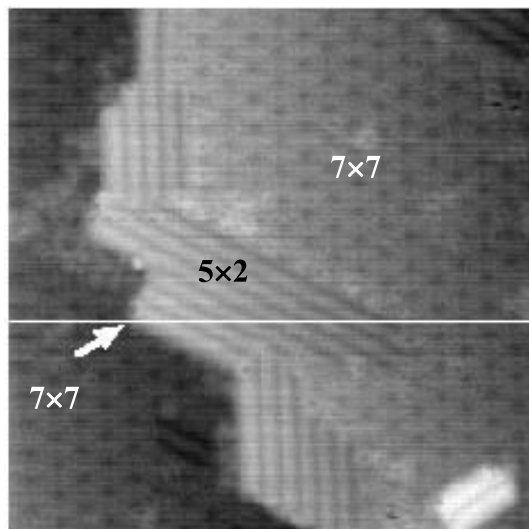


Fig. 8 NC-AFM image at $V_T = 0.4$ V.

以上のように、通常の NC-AFM 観察において観察表面に異種元素を含む領域がある場合には、その領域と主領域との CPD を考慮して観察する必要がある、その指針を得る一つの手段として周波数シフトのバイアス電圧依存性の測定が有効である。このバイアス電圧依存性カーブを測定することで、探針-試料間に印加する電圧の予測はもとより、主領域と異種元素領域との CPD やそれらの領域と探針との CPD も求めることができる。

4.2 SKPM による観察

Fig. 9 は、Fig. 5 と同じく 7×7 および 5×2 構造が共存する Au/n-Si(111) 表面における NC-AFM 像 (a) および CPD 像 (b) を同時観察したもので、ロックインアンプの出力をゼロに維持するフィードバックは行っていない。

ない。スキャンサイズは $100 \times 100 \text{ nm}^2$ である。図のように CPD 像において 7×7 と 5×2 領域が明瞭に識別できることがわかる。NC-AFM 像において 7×7 構造のユニットセルがメッシュ状に観察されている。CPD 像においては、暗いほど仕事関数が高い（電位が低い）ことを示しており、ここでは 5×2 領域の方が 7×7 領域より約 0.45 eV 大きく観察されている。この結果は、Fig. 7 のカーブから求めた値と大小関係は一致するが、その差は大きくなっている。これは、 5×2 領域のサイズやその領域での Au 含有量の違いに起因するものと考えられる。

次に、ロックインアンプの出力をゼロに維持するフィードバックを動作させた場合であるが、Fig. 10, 11 は n 型の Si(111) 7×7 構造に (a) Ag を蒸着した表面の NC-AFM 像、および (b) CPD 像である。スキャンサイズは共に $20 \times 20 \text{ nm}^2$ である。Fig. 10 は Fig. 11 より Ag の被覆率が大きく、表面全体が Ag クラスタに覆われており、その一部は六角形状に Ag が結晶化している。この CPD 像によると、Ag の結晶化領域の方が Ag クラスタより約 20 meV 仕事関数が高いと見積もられる。一方、Fig. 11 においては、NC-AFM 像での白い輝点が Ag クラスタに相当しているものと推測でき、図中下に示した 7×7 構造のユニットの右半分に優先的に吸着していることがわかる。それらのクラスタは CPD 像で若干明るく見える領域とほぼ一致しており、 7×7 構造の方が Ag クラスタより約 10 meV 仕事関数が高いことになる。

このように、SKPM によって原子レベルでの表面電位分布が 10 mV 程度の電位分解能で観察できることがわかったが、この領域での電位差が直接一般的な仕事関数の差として扱えるかどうかは定かではない。Si (上記実

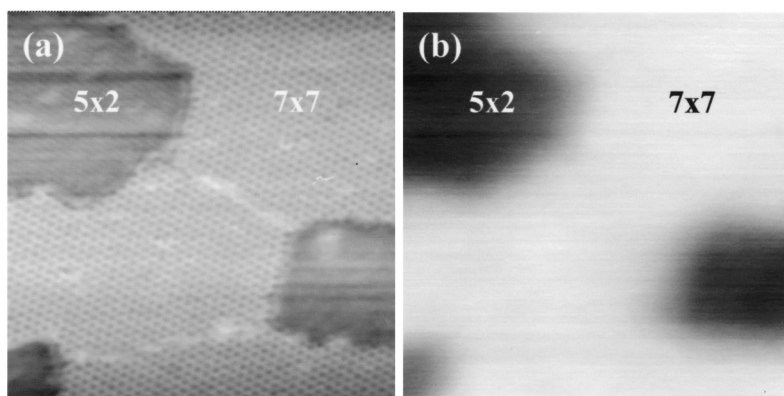


Fig. 9 NC-AFM and relative CPD images of Au/n-Si(111) surface with 7×7 and 5×2 phases. Area is $100 \times 100 \text{ nm}^2$. No feedback of V_{DC} voltage to the tip is made.

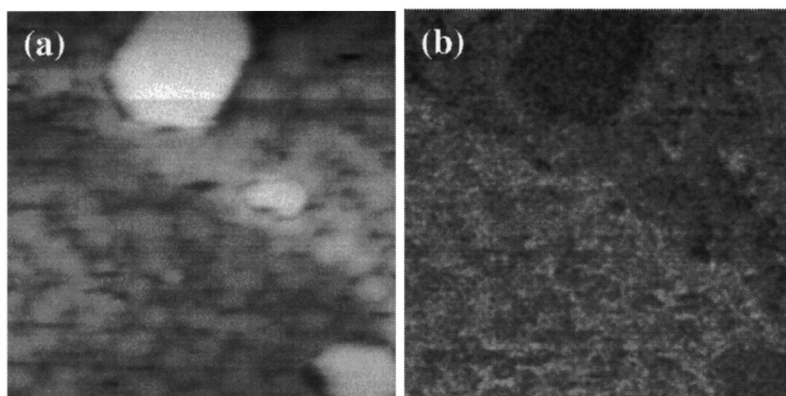


Fig. 10 (a) NC-AFM and (b) CPD images of Ag deposited n-Si(111) 7×7 surface in an area of $20 \times 20 \text{ nm}^2$. The feedback of V_{DC} voltage to the tip is made.

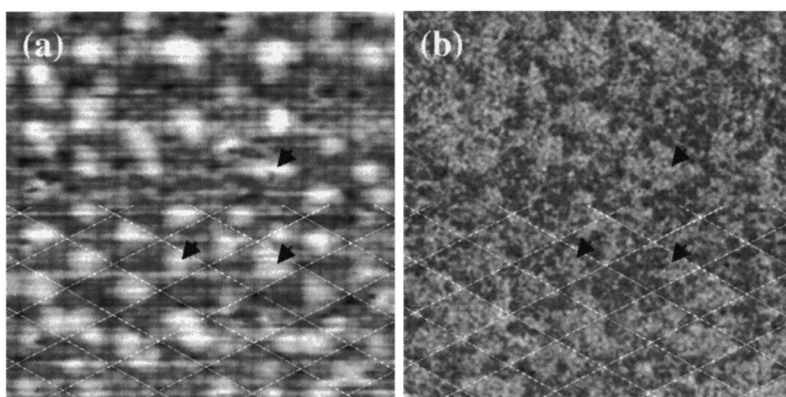


Fig. 11 (a) NC-AFM and (b) CPD images of Ag deposited n-Si(111) 7×7 surface in an area of $20 \times 20 \text{ nm}^2$. Ag coverage is less than in Fig. 10.

験ではn型)とAgとの仕事関数の差は、結晶の方位やSi中のドーパ量にもよるが比較的近い値¹³⁾であり、そのためFig. 11(b)のような低コントラストになったとも考えられる。そこでSiより確実に仕事関数が大きいとされているAuを蒸着し、その表面を観察した。

Fig. 12は、 $20 \times 20 \text{ nm}^2$ のスキャンサイズにおけるAuを蒸着したp型のSi(111) 7×7 表面のNC-AFM像(a)、およびCPD像(b)である。 7×7 表面上のAuクラスターは、NC-AFM像では白い輝点として観察されており、CPD像では電位がSi(111) 7×7 構造の電位より若干高く観察されている。すなわち仕事関数としては小さく観察されていることになる。しかし、図中に矢印で示した輝点は逆に電位が低く観察されており、Auクラスターとは異なる物質が存在することを示唆している。

一方、このように凹凸像(NC-AFM像)とほぼ一致するような原子レベルの空間分解能を持つCPD像には、

Zフィードバック遅延による探針-試料間距離の微妙なずれがCPD値の差として現れているのではないかとということが懸念される。Fig. 13は、CPDの探針-試料間距離依存性の有無を確認するために、CPDの周波数シフト依存性を測定した結果である¹²⁾。周波数シフトを大きく(マイナス方向に)するほど探針-試料間距離は小さくなり、周波数シフトが約25 HzでFig. 12(a)のような原子像が得られている。約5 Hz以上の周波数シフトでは、CPDは15 mV以下のばらつきで安定しており、これはCPDが探針-試料間距離に依存しないことを示唆している。またFig. 12(b)のアドアトムとその回りとの電位差は60 mV以上あり、これは原子像が観察されている25 Hz付近でのCPDのばらつきに比べ十分大きな値である。したがって、CPD像での原子レベルのコントラストは、探針-試料間距離依存性に起因したのではなく、実際に原子レベルの電位の違いを反映してい

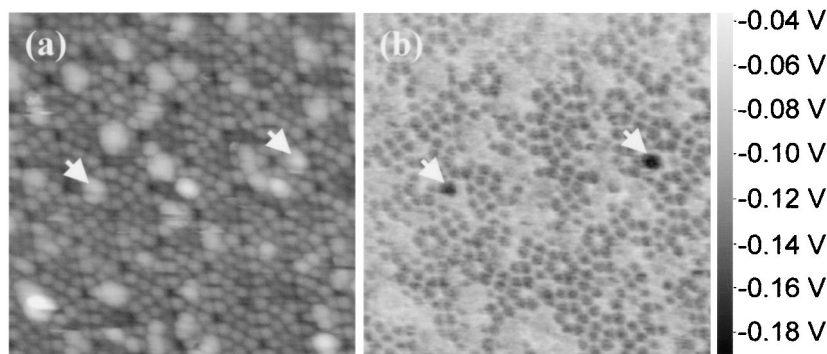


Fig. 12 (a) NC-AFM and (b) CPD images of Au deposited p-Si(111) 7×7 surface in an area of $20 \times 20 \text{ nm}^2$.

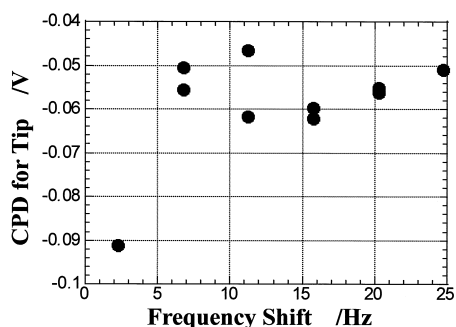


Fig. 13 Frequency shift dependence of CPD between the tip and sample, corresponding to the tip-sample separation dependence of CPD.

るものと推測される。

Fig. 12 の観察後、更に Au を蒸着し Au の被覆率を増加させた後の観察結果を Fig. 14 に示す。NC-AFM 像から Au クラスターが大きくなっていることがわかるが、

CPD 像のコントラストは Fig. 12 (b) と同様であり、Au クラスターの電位が高く観察されている。これは Au クラスターの仕事関数の方が Si のアダトムより小さいことを意味し、一般的な仕事関数の大小関係とは逆の結果である。また、クラスターの電位の方が高くなる傾向は Ag を蒸着したときと同じである。

この結果は、p-型の試料についてであるが、図示していないが、Ag の蒸着に用いた試料と同じ n-型の場合にも同様な結果が得られている¹²⁾。すなわち、原子レベルの表面電位観察では蒸着された金属の種類や基板の Si の p 型、n 型にかかわらず、金属クラスターの電位の方が高く観察されるということになる。それでは一般的な仕事関数との関係はどうなるのかを検討してみる。Fig. 12, 14 の CPD 像右側のグレースケールをみると、それぞれのバックグラウンドの CPD 値が異なっていることがわかる。比較のため、Fig. 12(b) と 14(b) の高さ方向の平均値をみると、それぞれ -0.097 V 、 -0.263 V である。この 2 つの観察では同じカンチレバーを使用

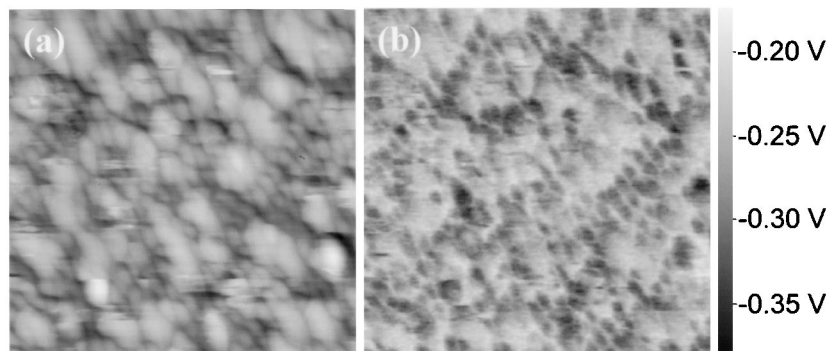


Fig. 14 (a) NC-AFM and (b) CPD images of Au deposited p-Si(111) 7×7 surface in an area of $20 \times 20 \text{ nm}^2$. Au coverage is higher than in Fig. 12.

しており、また同等の原子像が得られていることから、探針側の仕事関数はほぼ一定と考えられる。したがって、この平均値の比較から Au の被覆率が大きい Fig. 14 の表面の方が Au 被覆率の小さい Fig. 12 の表面より表面電位が低く、仕事関数は大きいことになり、一般的な仕事関数の大小関係と一致している。同じカンチレバーではないが、同じウエハーから切り出したカンチレバーを用いた n 型の試料においては、Fig. 12 とほぼ同じ Au 被覆率の場合で、平均値が 0.349 V で¹²⁾、仕事関数が小さくなっている。これは、n 型の Si の方が p 型より仕事関数が小さいことを反映した結果と考えられる。

次に原子レベルの電位の変化についてであるが、これは局所電子密度に依存すると考えることで理解される。すなわち、7×7 構造のアドアトムはダングリングボンドを持ち、そこでは電子が局在しているのに対して、金属クラスターでは電子の局在は起こらず、局所的な電子密度を比較するとアドアトムの方がクラスターより大きいことになる。また金属クラスターが結晶化した場合には、原子密度が増した分だけ電子密度も大きくなり、その結果 Ag の結晶化領域の電位の低下が引き起こされたものと考えられる。

5. ま と め

UHV NC-AFM が力の勾配を検出しているのと同様に、静電気力の勾配を検出する方式の UHV SKPM を開発し、Ag および Au を蒸着した S(111) 7×7 表面の表面電位観察を行った。その結果、10 meV 程度の電位分解能で原子レベルの電位分布を観察することができた。原子レベルの電位分布は表面の局所電子密度を反映していると考えられ、一般的な仕事関数との比較とは必ずし

も一致しないことがわかった。一方、CPD 像のバックグラウンドの値は一般的な仕事関数を反映しており、Au の被覆率が大きい程仕事関数が大きくなるという結果が得られた。

文 献

- 1) J.M.R. Weaver and D.W. Abraham: J. Vac. Sci. Technol. B **9**, 1559 (1991).
- 2) M. Nonnenmacher, M.P. O'Boyle and H.K. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. **58**, 2921 (1991).
- 3) A.K. Henning, T. Hochwitz, J. Slinkman, J. Never, S. Hoffmann, P. Kaszuba and C. Daghljan: J. Appl. Phys. **77**, 1888 (1995).
- 4) T. Hochwitz, A.K. Henning, C. Levey, C. Daghljan, J. Slinkman, J. Never, P. Kaszuba, R. Gluck, R. Wells, J. Pekarik and R. Finch: J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 440 (1996).
- 5) F.J. Giessibl: Science **267**, 68 (1995).
- 6) S. Kitamura and M. Iwatsuki: Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L 145 (1995).
- 7) H. Ueyama, M. Ohta, Y. Sugawara and S. Morita: Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L 1086 (1995).
- 8) S. Kitamura, K. Suzuki and M. Iwatsuki: JEOL News, **32** E, 42 (1995).
- 9) S. Kitamura and M. Iwatsuki: Appl. Phys. Lett. **72**, 3154 (1998).
- 10) S. Kitamura, K. Suzuki and M. Iwatsuki: Appl. Surf. Sci. **140**, 265 (1999).
- 11) S. Kitamura, K. Suzuki and M. Iwatsuki: JEOL News, **34** E, 53 (1999).
- 12) S. Kitamura, K. Suzuki, M. Iwatsuki and C.B. Mooney: Appl. Surf. Sci. **157**, 222 (2000).
- 13) "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 65th ed. (CRC Press, Florida, 1984) p. E-76.