

非接触原子間力顕微鏡で 半導体の何がどこまで見えるか？

森田 清三・菅原 康弘

大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻 ㊚ 565 0871 大阪府吹田市山田丘 2 1

(2001年8月6日受理)

To What Extent Can We Observe Semiconductor Surfaces Using NC-AFM?

Seizo MORITA and Yasuhiro SUGAWARA

Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565 0871

(Received August 6, 2001)

In this review article, we clarified what we can image on semiconductor surfaces using noncontact atomic force microscopy (NC-AFM): 1. We can image covalent bonding force on Si(111) 7×7 surface. 2. We can discriminate Si adatoms from Sb adatoms on Si(111) $5\sqrt{3} \times 5\sqrt{3}$ -Sb surface with a Si tip and a Sb adsorbed tip. 3. We can image tilted dangling bond on Si(100) 2×1 surface. 4. We can image individual hydrogen atom on Si(100) 2×1 : H monohydride surface. 5. We can measure atomic strain around missing dimer. 6. We can image a potential map on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface by measuring NC-AFM image as a function of tip-sample distance. 7. We can selectively control atomic force by placing an adequate atom on the tip apex. 8. We can pull up lower Si atoms constituting buckled Si dimer by increasing attractive force between tip and sample surface.

1. はじめに

非接触原子間力顕微鏡（非接触 AFM）は、テコ先端部分の突起（探針）先端原子と試料側最近接原子との間に働く微弱な原子間引力（または引力相互作用）を、テコの機械的共振周波数の変化（周波数シフト）として検出する¹⁾。ここでは、「非接触 AFM で半導体の何がどこまで見えるか？」の現状を紹介する。

2. 共有結合力（共有結合による引力）を見る

半導体表面には結晶を形作る共有結合が切れた原子が存在する。例えば、Fig. 1 のような Si(111) 7×7 再構成表面では、共有結合が切れたダングリングボンド（未結合手）を持つ Si 吸着原子（アダトム）が最表面に存在して、ダングリングボンドが鉛直方向に延びている。この Si 吸着原子が持つダングリングボンドに、Si 探針先

端の Si 原子が持つダングリングボンドを近づけると、ダングリングボンド同士で共有結合を作ろうとする引力（共有結合力）が働く。他方、Si 結晶の共有結合は sp^3 混成軌道でできており強い方向性を持つため、ダングリングボンドも強い方向性を持つと考えられる。その結果、Fig. 1 (a) のように Si 吸着原子の真上 (Sa) に Si 探針先端の Si 原子が近づいてきた場合は共有結合力が働くが、Fig. 1 (b) のように Si 吸着原子の間 (Sh) に Si 探針先端の Si 原子が近づいてきた場合には共有結合力は働かないと予想される。これを実験で確認するために、清浄な Si 探針を用いて Fig. 2 (a) のように Si(111) 7×7 の非接触 AFM 像を測定しながら、Si 吸着原子の真上 (Sa) と Si 吸着原子の間 (Sh) で探針の走査を止めて、周波数シフトの探針 試料間距離変化を測定した。その結果、Fig. 2 (b) に示すように、Si 吸着原子の間 (Sh) では周波数シフトの探針 試料間距離変化は滑らかだが、Si 吸着原子の真上 (Sa) では周波数シフトの探針 試料間距離変化に不連続が見いだされた²⁾。この不連続は共

E-mail: smorita@ele.eng.osaka-u.ac.jp

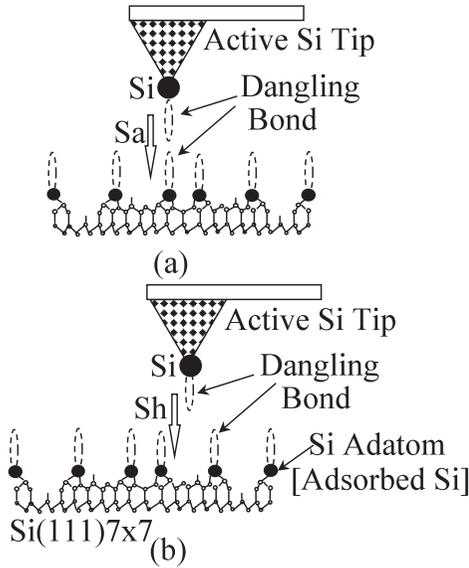


Fig. 1 Schematic model of force mapping on Si(111)7 × 7 where Si tip with a dangling bond approached (a) toward on adatom (Sa) and (b) toward off adatoms (Sh).

有結合力効果で、強い共有結合力により原子の位置変化が起こったためと予想される。この不連続を利用して Si (111)7 × 7 の非接触 AFM 像を測定したのが Fig. 2 (a) で、断面図の周波数変化 8 Hz は周波数シフトの不連続の大きさと一致している。この結果より、Fig. 2 (a) の非接触 AFM 像は、ダングリングボンド（効果）を画像化したものであると結論できる。なお、酸化した Si 探針で同様な実験を行った場合は、周波数シフトの不連続は現れず、非接触 AFM の断面図の周波数変化も小さくなった³⁾。この結果は、酸化により探針側にダングリングボンドが無くなったので共有結合力が働かなくなったと理解できる。

3. 原子の力学的判別・同定（結合次数の相違を見る）

4 個の外殻電子を持つ IV 属の Si 原子（原子価 4）の sp^3 混成軌道が作る $S\bar{X}(111)$ 面では、Si 吸着原子は Si 結晶側と 3 つの共有結合を作り残り一つが未結合（切れた結合）で有るため、ダングリングボンドは一個の電子のみを持つ。しかし、III 属の Al 吸着原子や V 属の Sb 吸着原子が $S\bar{X}(111)$ 面上に存在する場合は、それぞれ 3 個と 5 個の外殻電子を持つため、未結合部分が空軌道とローンペア（未結合電子対）になる。したがって、例えば、 $S\bar{X}(111)$ 面上の Sb 吸着原子に Si 探針が近づくと Fig. 3 (a) 右に示すように 2 個の電子が結合軌道に入り

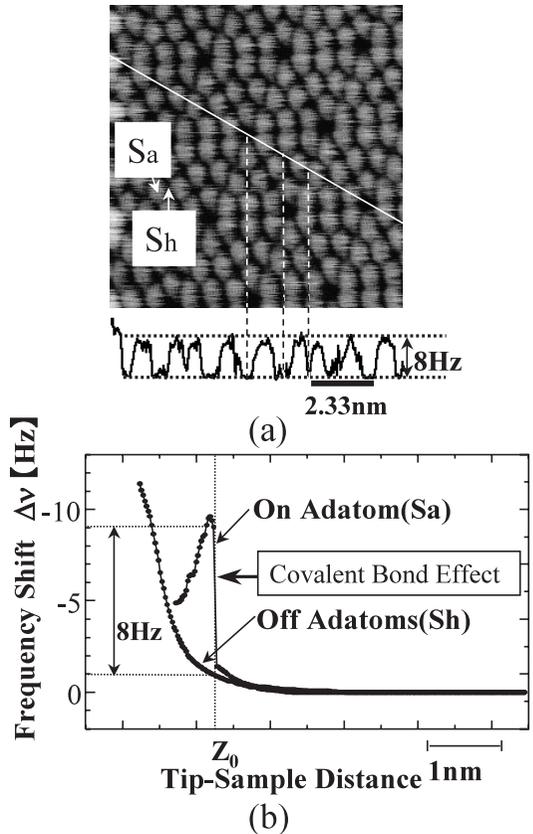


Fig. 2 Force mapping of Si(111)7 × 7 using noncontact AFM. (a) Noncontact AFM image of Si(111)7 × 7 and the line profile along the white solid line. (b) Comparison of frequency shift curves on adatoms (Sa) and off adatoms (Sh).

残った 1 個の電子は反結合軌道に入る。その結果、結合によるエネルギー低下は $\Delta U(Z) = -\Delta E(Z)$ となり、Si 吸着原子に Si 探針が近づいた場合のエネルギー低下 $\Delta U(Z) = -2\Delta E(Z)$ の半分となり、エネルギー低下の探針 試料間距離 Z 微分である原子間力 $F(Z) = -d\Delta U(Z)/dZ$ も弱くなる。他方、 $S\bar{X}(111)$ 面上の Sb 吸着原子に Sb 探針が近づくと Fig. 3 (b) 右に示すように 2 個の電子が結合軌道に入り残った 2 個の電子は反結合軌道に入る。その結果、結合によるエネルギー低下は無くなり、共有結合力は働かなくなる。つまり、結合によるエネルギー低下及び原子間力は、結合軌道に入る電子数 n_b と反結合軌道に入る電子数 n_a の差つまり結合次数 $n = (n_b - n_a)/2$ に比例する。したがって、非接触 AFM により、結合次数の相違を共有結合力の差として画像化できることと、これを利用して原子の判別・同定ができることがわかる。

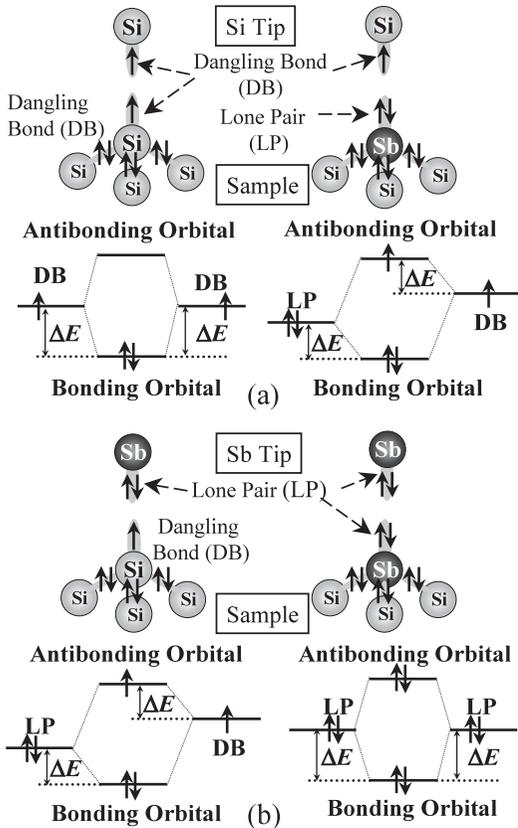


Fig. 3 Schematic model of orbital mixing. (a) Observation of Si adatom or Sb adatom with Si tip. (b) Observation of Si adatom or Sb adatom with Sb tip.

以上の予測を実験で裏付けるために、Si 吸着原子と Sb 吸着原子が共存する $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面を非接触 AFM で観察してみた。Fig. 4 (a) は清浄な Si 探針で観察した $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面で、共有結合力が働いている吸着原子が白く明るく見えている。さらに吸着原子を注意深く見てみると、吸着原子には白い矢印で示したような「より明るいもの」と「少し明るさが劣るもの」の 2 種類が存在することがわかる。Fig. 3 (a) に基づいて考えると、「より明るいもの」は Si 吸着原子で、「少し明るさが劣るもの」は Sb 原子である可能性が高い。そこで、Si 探針を試料側にさらに 0.03 nm 近づけて再度非接触 AFM 観察を行った。その結果、Fig. 4 (b) 下部に示すように、最初は少し右側にドリフトした以外は再現性が有ったのが、白い破線の丸で囲んだ所の原子が見えなくなり、白抜きの矢印で示した、それより上側の非接触 AFM 観察像は左側と全く異なってしまった。しかし、両方の非接触 AFM 像を比較した結果、白い矢印で

示した「より明るいもの」だけが明るく残って、「少し明るさが劣るもの」がほぼ見えなくなったと考えると説明できることが判明した。この結果は、白い破線の丸で囲んだ所で Si 探針が Sb 原子をピックアップして、それ以降は Sb 探針となったため、Fig. 3 (b) に示すように、Si 吸着原子だけ共有結合力が働いて明るく画像化され、Sb 原子には共有結合力が働かなくなり弱い物理的結合だけで相対的に暗く画像化されたと理解できる。以上の結果は、非接触 AFM により、結合次数の相違を共有結合力の差として画像化できることと、これを利用して原子の判別・同定ができることの証明である。

4. 斜めに延びたダングリングボンドを見る

$\text{Si}(100)$ 理想表面では、最表面の Si 原子は 2 つのダングリングボンドを持つ。その結果、エネルギー的に不安定なダングリングボンドの数を減らすために、Fig. 5 (a) に示すように、隣り合った Si 原子が持つダングリングボンド同士で共有結合を作って安定化して、Si ダイマー（二量体）からなる 2×1 再構成を形成する。ダイマーを構成する個々の Si 原子は 1 個の斜めに突き出したダングリングボンドを持っているため、この表面は活性である。さらに、エネルギー的により安定化するため、一方のダングリングボンドから他方に電子が移動して、 sp^3 混成軌道の試料側は sp^2 的なものと p^3 的なものとなり、片方の Si 原子は下方にもう一方は上方に移動してバックリング（非対称ダイマー）構造を取る。しかし、室温では熱的な励起により、2 つの Si 原子の間で交互に電子が移動して、バックリング構造がフリップフロップするため、時間平均するとバックリング構造は見えず対称ダイマーからなる $\text{Si}(100)2\times 1$ 構造に見える。

この表面で、非接触 AFM 測定に対する斜めに突き出したダングリングボンドの影響を調べるために、清浄な Si 探針を用いて Fig. 6 (a) のような非接触 AFM 像の測定を行った⁴⁾。その結果、 $\text{Si}(100)2\times 1$ 構造が明瞭に観察され、ダイマーを構成する原子間引力のサイト（輝点）の間隔が 0.32 ± 0.01 nm であることが判明した。この間隔は、バックリング構造のフリップフロップ効果を考慮した Fig. 5 (a) のダイマーを構成する Si 原子間隔の最大値 0.29 nm に較べてもさらに広く、ダイマーを構成する Si 原子から斜めに延びたダングリングボンドと Si 探針が持つダングリングボンドとの間に働く共有結合力を画像化した結果、斜めに延びたダングリングボンドの中心が原子間引力のサイトとして画像化されたと結論できる。

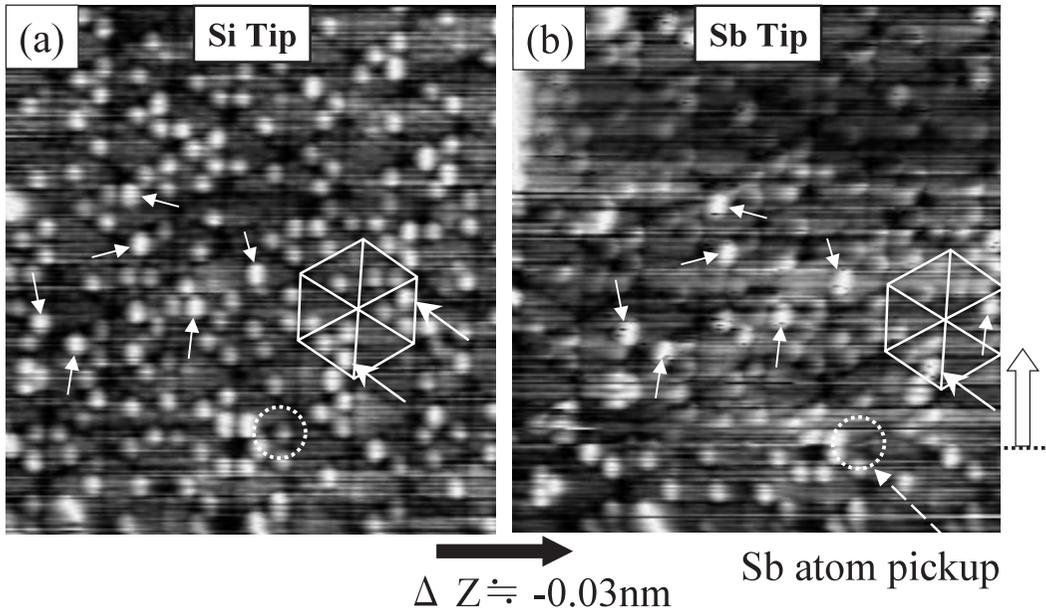


Fig. 4 NC-AFM images of Si(111) $5\sqrt{3}\times 5\sqrt{3}$ -Sb. (a) Clean Si tip. (b) After 0.03 nm approach toward the sample. In case of (b), clean Si tip picked up Sb atom at the site encircled by dotted white circle and became to be Sb tip after that. Scan areas are 14 nm \times 14 nm.

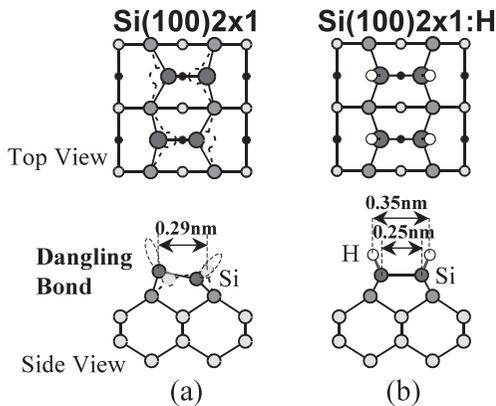


Fig. 5 Schematic models of top views and side views of (a) Si(100) 2×1 active surface and (b) hydrogen passivated Si(100) 2×1 :H monohydride inactive surface.

5. 個々の水素原子を見る

Si(100)表面を水素で終端すると、Fig. 5 (b)のようなSi(100) 2×1 :Hモノヒドライド構造ができる。この表面は水素の終端でダングリングボンドが無くなるので、不活性でバックリングも起こらない。この不活性な表面が非接触AFMで見えるか？小さな個々の水素原子が見えるか？を調べるため、清浄なSi探針を用いてFig.

6 (b)のような非接触AFM観察を行った⁴⁾。その結果、不活性なSi(100) 2×1 :H表面でも 2×1 構造が観察され、ダイマーを構成する原子間引力のサイト(輝点)の間隔が 0.35 ± 0.01 nmであることが判明した。この間隔は、Fig. 5 (b)の 2×1 構造を構成するSi原子間の間隔0.25 nmより明瞭に大きく、水素原子間の間隔0.35 nmと完全に一致する。この結果は、非接触AFMで不活性なSi(100) 2×1 :H表面の個々の水素原子が見えることを直接示している。

6. 原子レベルの歪みを見る

結晶には様々な応力や歪みが発生する。特に欠陥周辺には様々な欠陥特有の応力や歪みが発生するが、ミクロな応力や歪みの観測は極めて困難である。そこで、Fig. 7のSi(100) 2×1 非接触AFM像で、ダイマー欠陥周辺の歪みの計測を試みた¹⁾。Fig. 7中の白い破線はダイマーの中心線を示すが、白い矢印で示したダイマー欠陥周辺では、ダイマーの中心位置がダイマー欠陥側にずれている。このことは、単純に考えるとダイマー列方向に沿ってダイマー間に斥力が働いていて、ダイマー欠陥の無い所では釣り合っているが、ダイマー欠陥周辺では押し戻す斥力が働かないため、ダイマーの中心位置がダイマー欠陥側にずれると解釈できる。ダイマー中心の平均的位置ずれをFig. 7中の表に示した。N=1の最近接ダイ

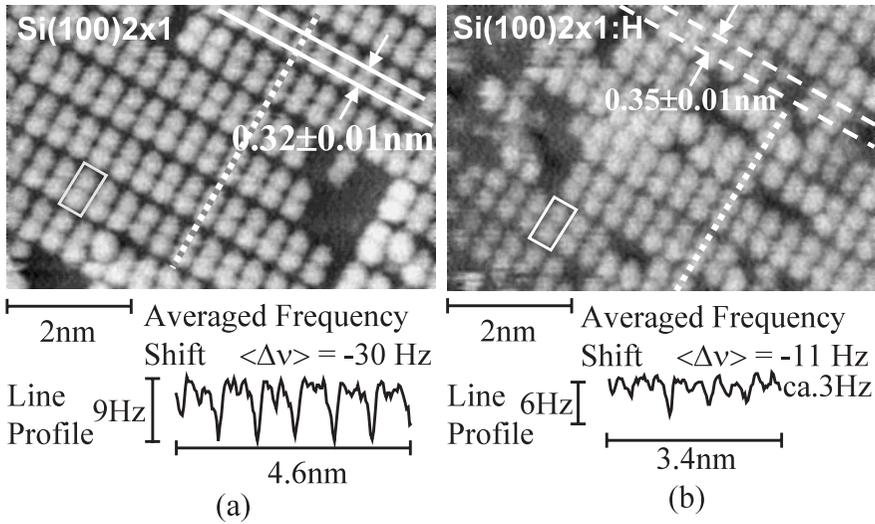


Fig. 6 NC-AFM images and line profiles of (a) Si(100)2 × 1 active surface and (b) hydrogen passivated Si(100)2 × 1 : H monohydride inactive surface.

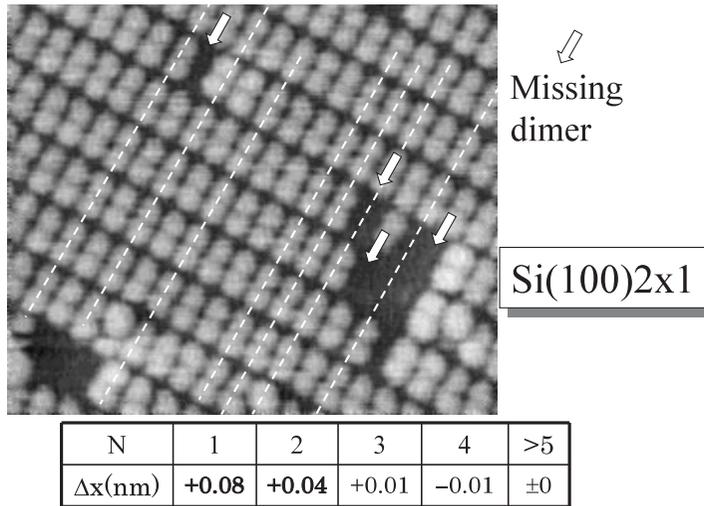


Fig. 7 NC-AFM image of Si(100)2 × 1 surface and table of averaged lateral shift $\Delta x(\text{nm})$ of dimers toward missing dimers. N means the N-th neighbor dimer of missing dimers.

マーでは 0.08 nm , $N=2$ の 2 番目のダイマーでは 0.04 nm , それ以遠では誤差の範囲内でダイマーは動かない。同じ実験を水素で終端した不活性な $\text{Si}(100)2 \times 1 : \text{H}$ モノヒドライド表面で行ったところ, ダイマー欠陥周辺でも位置ずれは観測できなかった。この結果は, 水素終端により, ダイマー欠陥周辺の応力や歪みも緩和された

と推測できる。

ダイマー欠陥周辺の応力や歪みを Fig. 8 のようなモデルで考えてみる。Fig. 8(a) の $\text{Si}(100)2 \times 1$ モデルでは, ダイマー欠陥の無い所ではダイマーを構成する 1 層目の Si 原子間に矢印方向の引力が働く。その結果, 1 層目の Si 原子同士の間隔は, 0.384 nm の格子間隔から 0.234 nm

のダイマー間隔に変化する。この間隔変化により、1層目のSi原子と結合している2層目のSi原子も矢印で示した方向に引っ張られる。その結果、表面積を一定に保つためにダイマー列方向には斥力が発生すると考えられるが、バックリングやフリップフロップを考えると問題は微妙になる。他方、ダイマー欠陥周辺では、2層目のSi原子と結合していた1層目のSi原子が無くなるため、2層目のSi原子がダングリングボンドを持つようになる。この2層目のSi原子が持つダングリングボンド同士がFig. 8 (a)の破線で示した方向にダイマーを形作れば、周辺の1層目のダイマーはダイマー欠陥方向に引

っ張られる。ダイマー欠陥部にてできる2層目のダイマーの大きさが1層目のダイマーと同じ0.234 nm程度とするとFig. 7中の表に示した程度の位置ずれが起こりうる。他方、Fig. 8 (b)のSi(100)2×1:Hモノヒドライド表面では、ダイマー欠陥部にてできる2層目のSi原子が持つダングリングボンドも水素で終端されるために2層目にダイマーはできず、その結果、1層目のダイマーの位置ずれも起こらなくなる。以上の解釈に関しては今後理論的裏付けが必要であるが、非接触AFMで原子レベルの歪みを見ることができるとは今後非常に重要と思われる。

7. ポテンシャル・マップを見る

結晶表面ポテンシャルは、表面からの距離とともに変化する。このポテンシャル変化が非接触AFMの距離変化にどのように現れるかは非常に興味がある。そこで、表面に2種類の原子が存在するSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面で、非接触AFM像の探針試料間距離変化を清浄なSi探針を用いて調べてみた。その結果、Fig. 9 (a), (b), (c)に示すような非接触AFM像のパターン変化がはじめて見いだされた⁵⁾。接触点から0.2-0.3 nmの少し遠方では引力が働くサイト(輝点)が六角形を成し、菱形のユニットセル中に2個のサイトが存在した。しかし、Z=0.05 nmに近づくと引力の弱い暗い部分が三つ葉形のパターンとなり、Z=0.03 nmの接触点直前では引力が働くサイト(輝点)がトライマー(三量体)を成し、菱形のユニットセル中に3個のサイトが存在した。このようなパターンの距離変化は、距離と共に引力のサイト(または原子)や原子間力の機構が変わっていることを示す

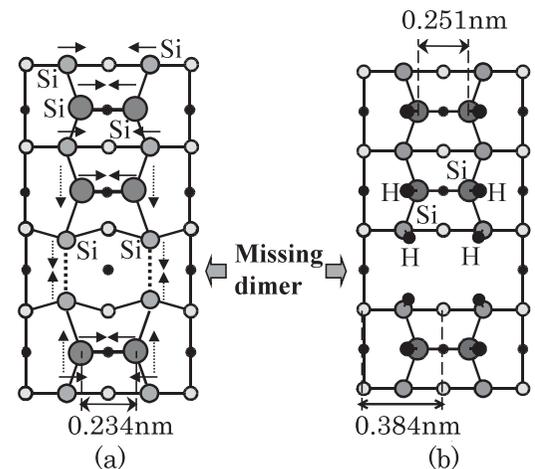


Fig. 8 Schematic models of top view around missing dimer (a) on Si(100)2×1 surface and (b) on Si(100)2×1:H monohydride surface.

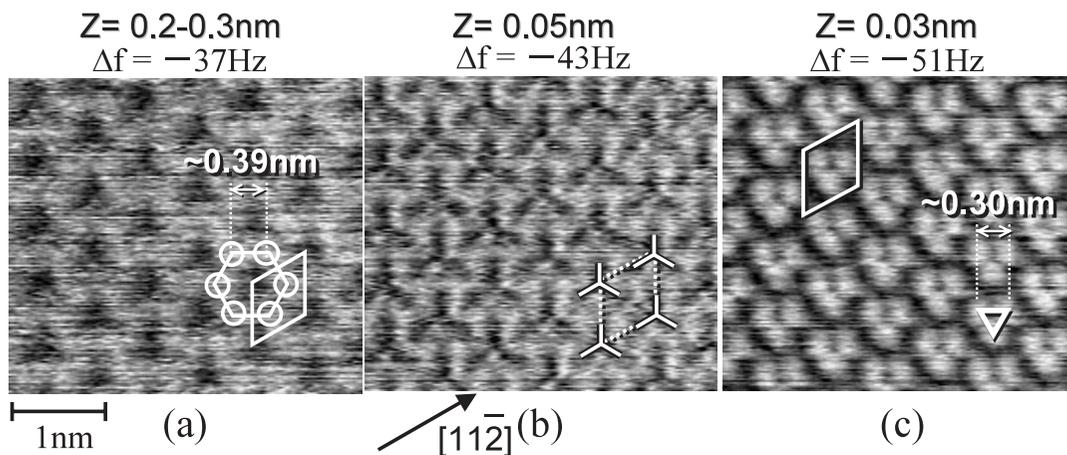


Fig. 9 Tip-sample distance dependence of NC-AFM image obtained with the clean Si tip. (a) Image at the rather far distance of Z = 0.2-0.3 nm, (b) image at the near distance of Z = 0.05 nm and (c) image at the close distance of Z = 0.03 nm.

ものと思われる。 $S\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag 表面の構造モデルとパターンや輝点の間隔を比較した結果、遠方では Ag トライマーの中心部分から弱い引力が、接触点直前では最表面の Ag 原子とその下の Si 原子との間の共有結合の中心で強い引力が働くことが判明した。なお、 $Z=0.05$ nm の中間距離では 2 種類の引力が同じ程度の強さで働いていると考えればパターンが説明できる。画像化機構の解釈には今後の理論的検討が必要であるが、この実験結果は、非接触 AFM で試料表面ポテンシャルの距離変化つまりポテンシャル・マップの測定が可能であることを示すものである。

8. 原子間力を選択的に制御する

非接触 AFM で測定する引力は、探針先端原子と試料側最近接原子の間に働く原子間力であるため、その強さは Fig. 3 や Fig. 4 のように原子の種類や組み合わせにより選択的に制御できる。そこで、 $S\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag 表面に清浄な Si 探針を近づけて Ag 原子をピックアップして、Ag 探針による $S\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag 表面の非接触 AFM 像の距離変化を測定してみた⁶⁾。その結果、Fig. 10 (a),(b),(c) に示すように、パターンの距離変化が無くなり、パターン自体も清浄な Si 探針で測定した Fig. 9 の非接触 AFM 像のパターンとは異なったものに変化した。 $S\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag 表面の構造モデルとパターンや輝点の間隔を比較した結果、個々の Ag 原子が画像化されたことが判明した。この事実は、探針先端原子を Si 原子から Ag 原子に変えた結果、試料表面の個々の Ag 原子との相互作用が強くなり他の相互作用は相対的に弱くなったと解釈できる。つまり、探針先端原子を置換す

ることにより、原子間力の強さや機構だけでなく相互作用する原子自体も選択的に制御できることを示すものである。

9. 原子を制御して動かす

探針先端原子を試料側にどんどん近づけていくと、原子間《引力》が強くなり、さらに近づけると原子間《斥力》が強くなり始めるため引力は弱くなり、ついには完全な斥力となる。この領域で探針先端から試料側原子に働く強い引力で試料側原子を制御して動かせる可能性がある。この予測を実験で確認するために、5 K に冷却した $S(100)$ 表面を清浄な Si 探針を用いて非接触 AFM 観察した。 $S(100)$ 表面は、Fig. 5 (a) に示すように、室温ではバックリング構造が熱的に不安定になりフリップフロップを起こす。しかし、5 K の極低温では、バックリング構造が凍結して安定となる。Fig. 11 (a),(b),(c) は、5 K の極低温で測定した非接触 AFM 像の距離依存性である。探針 試料間に働く原子間引力が弱い (a) の遠方と (b) の中間距離では非接触 AFM 像に再現性が認められパターンの距離依存性は無かった。(b) では広範囲に六角形構造が明瞭に観察されたため、5 K の極低温では (4×2) の非対称ダイマー構造が安定であると結論した。しかし、Si 探針をさらに試料側に近づけた (c) では、 (4×2) 構造は 2×1 的な構造に変化した。このような探針 試料間距離に依存した構造変化は、Fig. 12 (a) と (b) のようなモデルで説明できる。つまり、Fig. 12 (a) のように距離が遠い場合は、探針 試料間に働く原子間引力は弱いため本来の (4×2) 構造が観察される。しかし、Fig. 12 (b) のように距離が近くなる

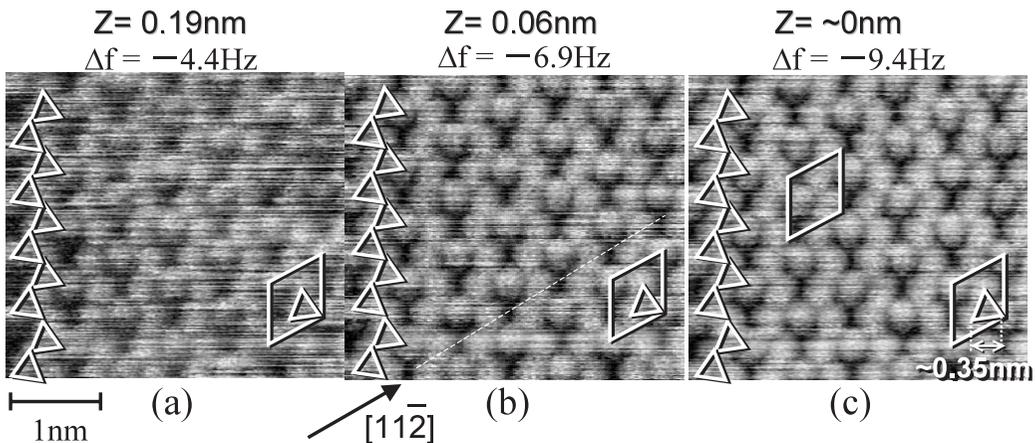


Fig. 10 Tip-sample distance dependence of NC-AFM image obtained with the Ag adsorbed tip. (a) Image at the rather far distance of $Z=0.19$ nm, (b) image at the near distance of $Z=0.06$ nm and (c) image at the close distance of $Z=\sim 0$ nm.

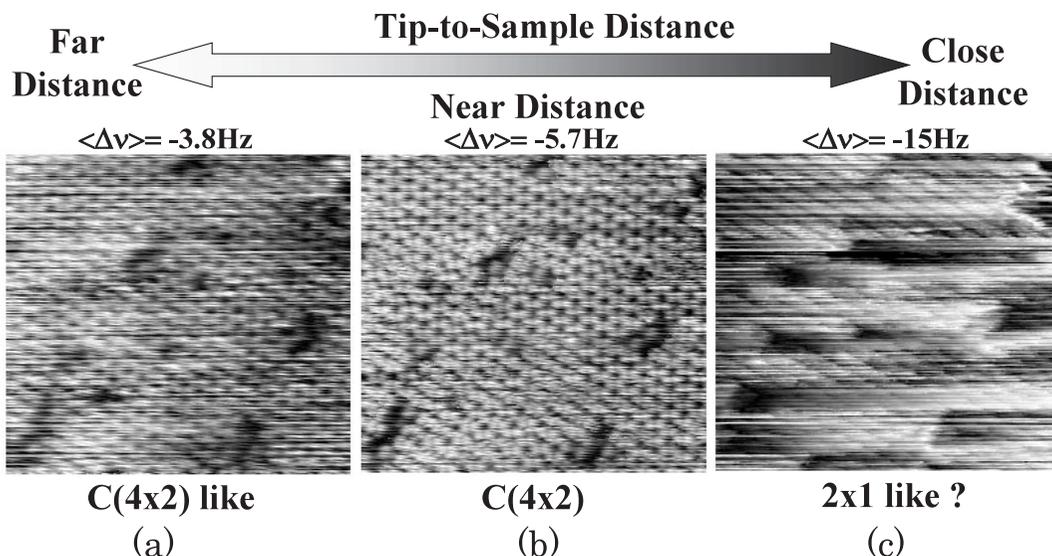


Fig. 11 Tip-sample distance dependence of NC-AFM image on Si(100) at 5 K obtained with clean Si tip. (a) Image at the rather far distance, (b) image at the near distance and (c) image at the close distance. Scan area is 17.4 nm × 18.8 nm.

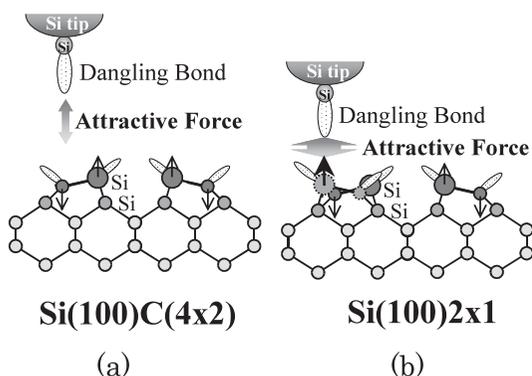


Fig. 12 Schematic side view of Si(100) at 5 K under NC-AFM measurement with clean Si tip. (a) Side view at the rather far distance where original $c(4 \times 2)$ is stable. (b) Side view at the close distance where each nearest Si atom is pulled up by Si tip and tip induced 2×1 structure appears.

と、探針 試料間に働く原子間引力が強くなり、最近接の Si 原子を強く上に引っ張り上げる引力が働き始める。その結果、バックリング構造が引力により反転するため、探針直下の Si 原子は常にバックリング構造の上側原子となり、探針の引力で誘起された 2×1 的な構造が画像化されたと結論した。

10. おわりに

1986 年の AFM 発明から 10 年近く経過した 1995 年

に、真の原子分解能を実現した非接触 AFM は、黎明期を脱して急速な発展期・成長期に入りつつある。ここで紹介したように、非接触 AFM で半導体の「共有結合力（共有結合による引力）が見える」、「原子の力学的判別・同定ができる（結合次数の相違が見える）」、「斜めに延びたダングリングボンドが見える」、「個々の水素原子が見える」、「原子レベルの歪みが見える」、「ポテンシャル・マップが見える」、「原子間力を選択的に制御できる」、「原子を制御して動かせる」ことが判明した。ここでは省略したが、「原子レベルの点欠陥の実時間観察」⁹⁾、「点電荷や遮蔽電子雲の原子レベル静電気力観察」⁸⁾、「金属原子の観察」⁹⁾等も実現している。

力学に基づいた非接触 AFM で、原子や分子を「観察」、「計測」、「制御」することに成功した現在、次の目標として、原子や分子の「操作」、「組立」が視野に入ってきた。力学に基づいた非接触 AFM は、絶縁体も見える、原子間力や分子間力が測れるなど、走査型トンネル顕微鏡 (STM) には無い特徴がある。21 世紀に到来する「原子・分子の科学と技術の時代」に必要な微細組立方式の実現には、多様な原子や分子を扱う様々な機能を持つ多種類の工具が必要となる¹⁰⁾。現時点での『原子・分子用工具箱』には、ほぼ完成された「電気的方法に基づいた STM」と黎明期を脱した「力学的方法に基づいた AFM」が入っているが、急速な成長期・発展期に入った AFM 特に非接触 AFM の今後のさらなる研究・開発を急ぐ必要がある¹⁰⁾。

文 献

- 1) 森田清三：“はじめてのナノプローブ技術” (工業調査会, 2001).
- 2) S. Morita, Y. Sugawara, K. Yokoyama and T. Uchihashi: *Nanotechnology* **11**, 120 (2000).
- 3) T. Uchihashi, Y. Sugawara, T. Tsukamoto, M. Ohta and S. Morita: *Phys. Rev. B* **56**, 9834 (1997).
- 4) K. Yokoyama, T. Ochi, A. Yoshimoto, Y. Sugawara and S. Morita: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L 113 (2000).
- 5) T. Minobe, T. Uchihashi, T. Tsukamoto, S. Orisaka, Y. Sugawara and S. Morita: *Appl. Surf. Sci.* **140**, 298 (1999).
- 6) K. Yokoyama, T. Ochi, Y. Sugawara and S. Morita: *Phys. Rev. Lett.* **83**, 5023 (1999).
- 7) Y. Sugawara, M. Ohta, H. Ueyama and S. Morita: *Science* **270**, 1646 (1995).
- 8) S. Morita, M. Abe, K. Yokoyama and S. Morita: *J. Cryst. Growth* **210**, 408 (2000).
- 9) S. Orisaka, T. Minobe, T. Uchihashi, Y. Sugawara and S. Morita: *Appl. Surf. Sci.* **140**, 243 (1999).
- 10) 森田清三編著：“走査型プローブ顕微鏡 基礎と未来予測” (丸善, 2000).