金ナノワイヤ構造・コンダクタンスの 結晶方位依存性

大 島 義 文

東京工業大学大学院総合理工学研究科材料物理科学専攻 ㊞ 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田 4259-J 1-3

(2005 年 4 月 20 日受理)

Structure and Electrical Conductance of Gold Nanowire Depending on the Crystalline Orientation of the Electrode

Yoshifumi OSHIMA

Department of Material Science and Engineering, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

J 1-3, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8502

(Received April 20, 2005)

A new transmission electron microscope-scanning tunneling microscope (TEM-STM) system was developed in order to simultaneously investigate structure and electrical conductance of gold contacts in ultra high-vacuum TEM. We found that the gold contact parallel to the [001] or [111] direction of both electrodes became short neck, while the contact parallel to the [110] direction, long nanowire. When the contact was short neck, the electrical conductance changed stepwise at some points and did discontinuously at the other parts. In this case, the broad conductance peaks appeared in the histogram. On the other hand, when the contact was long nanowire, the conductance changed stepwise and showed an integer times the quantum unit of conductance ($G_0 = 2e^2/h$). In the histogram, the sharp peaks appeared. These experimental results were qualitatively in agreement with the previous theoretical results based on the mesoscopic theory.

1. 緒 言

微細加工技術の進歩や走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM) などの測定技術向上により、原子レベルの物性制御が可能となりつつある。STM 法は、表面の構造や電子状態に関する情報を得るだけでなく、原子レベルで平坦な表面上での原子のマニピュレーションなど、原子加工ツールとしても用いられている。最近、STM のティップを試料面に接触したり引離したりする過程で、原子レベルの金属接点を形成した際、そのコンダクタンスが階段状に変化する様子が見出され、注目を集めた^{1~3)}。その後、このようなコンダクタンスの階段状変化は、STM 法 (Fig. 1 (a)) や機械的制御による破断法 (Mechanical Controllable Breaking Junction: MCBJ 法)⁴⁾ (Fig. 1 (b)) によって見出されている。MCBJ 法は、STM 法に比べ接触や引離し過程に

おける変位量を 2 桁程度小さくできることから、準静的な構造変化を観察できると考えられていた。つまり、MCBJ 法で測定されたコンダクタンス変化は、常に似たような振る舞いになると思われたが、実際は、測定ごとに異なる振る舞いを示す。Fig. 2 (a) は、同じ条件で引き離した場合の測定結果 2 例を示している。左のコンダクタンスは、4.5, 2.9, 2.4, 1.6, 0.9 G_0 と変化している。一方、右は、4.2, 2.6, 1.75, 0.9 G_0 と変化しており、前者とは異なる数値をとる。さらに、同じ条件で変化させたにもかかわらず、コンダクタンスの滞在時間は左のほうが 2 倍以上長い。そこで、一般に、Fig. 2 (b) に示すように、多数の金接点のコンダクタンス測定から得られたコンダクタンス・ヒストグラムから、優先的に現れるコンダクタンス値を求めている。金接点の場合、Fig. 2 (b) に示すように、コンダクタンス量子化単位 ($G_0 = 2e^2/h = 1/12.6 \text{ k}\Omega$) の整数倍が優先的に現れる。ここで e は素電荷量、 h はプランク定数である。つまり、金接点は、量子化コンダクタンスを示している^{1~4)}。

E-mail: ohshima@materia.titech.ac.jp

Fig. 1. (a) Illustration of STM method. The contact is directly elongated (contracted) by a piezo actuator. (b) Illustration of MCBJ method. The contact is elongated (contracted) by bending the beam using a piezo actuator. The displacement at the contact is about a few percent of one of the piezo actuator.

Fig. 2. (a) Two typical conductance curves of gold contact, which were obtained by the MCBJ method. The contact was elongated by increasing the bias voltage for the piezo actuator. The conductance was measured at applying the bias voltage of 60 mV to the contact. (b) Typical conductance histogram of gold contact. This histogram clearly shows the conductance peaks at 1, 2 and 3 $G_0 (= 2e^2/h)$. Courtesy of Mr. Komiyama of Tokyo Institute of Technology.

金属接点のコンダクタンス計測は、様々な元素で行われており、コンダクタンスの振る舞いが元素によって異なることが明らかにされている。アルミニウムの場合、接点を引っ張る過程、すなわち、原子間距離を離す過程で、コンダクタンスが増加する現象が見出されている⁵⁾。

これは、伝導に s 電子だけでなく、p 電子も寄与していること、そして、この p 電子の伝導が原子配列や原子間距離に敏感であることで説明されている^{6, 7)}。また、白金単原子接点では、I-V 特性において非線形性が観測されている⁸⁾。これは、コンダクタンスに d 電子が寄与しており、この d 電子の伝導チャンネルの透過率が接点に印加されたバイアスに依存して変化するためと考えられている。このように金属接点のコンダクタンスは、構成原子の配列に依存することが特徴である。

一方、金接点は、原子間距離を離す過程において、コンダクタンスが一定であり、測定ごとに異なる値を示す理由は明らかになっていない。著者らは、この現象について、伝導に s 電子のみが寄与し、金接点の結晶方位が影響しているのではないかと考えた。接点を構成する原子の配列とコンダクタンスの関係は、理論計算の報告がいくつかあるものの^{9, 10)}、実験の報告はほとんどない。よって、本研究は、金接点の構造とコンダクタンスの関係を明らかにするため、透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM) と走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM) を組み合わせた手法 (TEM-STM 法) を開発し、構造とコンダクタンスの同時測定を行った。

2. TEM-STM 法

TEM-STM 法を用いることで、STM ティップとサンプル間に金接点、あるいは金ナノワイヤを作製し、その原子構造を TEM で観察し、同時に、そのコンダクタンスを STM で計測できる。このような電子顕微鏡とプローブ顕微鏡を組み合わせた手法は、ナノスケール材料の研究開発に有効な手段であることが示されている^{11~13)}。中でも、大西らは、超高真空 TEM (Ultra High Vacuum-TEM: UHV-TEM) に組み込むことができる小型 STM ホルダーを作製し、金原子鎖のコンダクタンスが $1 G_0$ であることを直接示すことに成功し¹⁴⁾、注目を集めた。この他にも、木塚ら¹⁵⁾や Erts ら¹⁶⁾によって、通常の TEM を用いた TEM-STM ホルダーの開発が行われ、金ナノワイヤの構造とバリスティック伝導・拡散伝導の違いに関する報告などがされている。

今回、我々は、UHV-TEM 用 STM ホルダーを開発し、金接点や金ナノワイヤの構造およびコンダクタンスを調べた¹⁷⁾。使用した UHV-TEM (JEM-2000 VF) は、電界放射型電子銃を備えており、高分解能観察ができる (加速電圧 200 kV)。対物ポールピース (Objective Pole Piece: OPP) は、TEM-STM を実現するために特別な仕様となっている¹⁸⁾。この OPP のギャップ内にゴニオメータと STM ホルダーを結合できるステージ (Stage) が用意さ

Fig. 3. (a) Design of the STM-TEM system for UHV-TEM. The STM holder is transferred through the STM pre-chamber to the stage which is placed at the center of the objective pole piece. The stage is attached to the goniometer of the TEM (not shown). (b) Illustration of the STM holder head. The STM tip stage is driven by a tube piezo and by an inchworm. A gold wire is placed between the tip and sample stage.

れており (Fig. 3 (a)), 開発した小型 STM ホルダーは, STM 予備チャンバー (STM pre-chamber) を通じて搬送されるようになっている。この電子顕微鏡には, イオンスパッタポンプとターボ分子ポンプが取り付けられており, 試料室内を超高真空 ($<3 \times 10^{-8}$ Pa) に保つことができる。ホルダー周りの圧力を 3×10^{-8} Pa に保つことで, 汚染の影響がない金接点や金ナノワイヤを作製でき, 金ポイントコンタクトの I-V (電流-電圧) 特性を再現性よく測定することができる¹⁹⁾。

開発した小型 STM ホルダーの概観を Fig. 3 (b) に示す。この STM ホルダーには, サンプル電極 (Sample electrode) とティップ電極 (Tip electrode) があり, 両電極間に金ワイヤ (Gold wire) を張ることができる。金接点や金ナノワイヤは, この金ワイヤを細くすることによって得られる。両電極間に吊り下げたナノワイヤが容易に切れないように, 両電極の剛性をできる限り高くしている。また, この STM ホルダーには, 探針の粗動と微動機構があり, 粗動として, インチワーム (バーレ社製) を用いてティップを軸方向に最大 5 mm 動かすことができ, 微動として, チューブピエゾ素子を用いて 3 方位にそれぞれ最大 1 μ m を 0.1 nm オーダーで動かすことができる。この STM ホルダーは, ベリリウム銅で作製し, ゴニオメータ・ステージは, チタンで作製している。

Fig. 4. Schematic illustration of the synchronized measurement method of the TEM-STM system. A source measurement unit was used for measuring the current, when the bias voltage (12.9 mV) was applied between both electrodes. TEM images of the videotape were synchronized with the conductance measurement using the timer.

互いに異なる金属にした理由は, この 2 つが真空中で結合した際にロックされないようにするためである。

Fig. 4 は, 開発したコンダクタンス計測システムである。チューブピエゾ動作やコンダクタンス計測は, パーソナルコンピュータ (PC) で制御した。コンダクタンス計測には, ソースメジャーユニット (ケイスレー社製 Model 236) を用いて, ティップとサンプル電極間に 12.9 mV を印加し, その電流値を読み取ることで行った。この場合, コンダクタンスが $1 G_0$ である金原子鎖では, 1 μ A 電流が流れる。コンダクタンスは, $\pm 0.01 G_0$ 範囲内の誤差で計測できる。また, コンダクタンス測定と TEM 観察像の同期は, PC とタイマー (Timer) の時間を合わせ, タイマーをビデオ画面にスーパーインポーズすることによって実現した。

上記 2 端子測定結果からコンダクタンスを解析する際, コンタクト領域外の残留抵抗については考慮しなかった²⁰⁾。この理由は, 十分に太い金線における抵抗は, 数 Ω のオーダー程度であり, 一方, 金接点の抵抗は, 数百から数 K Ω であったからである。また, このコンダクタンス計測において, 電子線の影響が懸念された。そこで, コンダクタンス計測中に電子線をオフにすることを試みた。その結果, ノイズレベル以外, 電流値は変わらなかった。電子線照射による電流は, 1 原子列当たり 2×10^{-17} A であり, 一方, 金接点の計測電流は, $8 G_0$ に対し, 8×10^{-6} A であった。したがって, 電子線照射による電流量は, コンダクタンス計測の電流量に比べ 10 桁以上低く, コンダクタンス測定に影響を与えない。

3. 接点・ナノワイヤの作製

金ナノワイヤは, ティップとサンプル電極間にくびれが入った金ワイヤ (直径 0.25 mm) を橋渡しし, インチ

ワームやピエゾを用いて引っ張ることによって得られた。金ワイヤのくびれは、塩化カルシウム溶液中にて電解研磨によって得られており、金ワイヤを引っ張った際に金ナノワイヤが形成する箇所となる。金ワイヤをSTMホルダーに取り付け、STM予備チャンパーにて、真空引きした後、1 Aの定電流を通電することによって、約1日、金ワイヤのアニールを行った。これは、金ワイヤからコンタミを除去するためである。また、アニールは、金ワイヤを再結晶化させる効果もある。そして、STMホルダーは、ゴニオステージへ搬送され、金ワイヤは、インチワームを用いて切れるまでゆっくりと引き伸ばされた。これによって、2つの電極を形成した。これらの電極の先端は、高分解能TEM像を得るのに十分薄い膜になっており、ピエゾを用いて互いに接近させることで、金接点を得た。ただし、両電極が多結晶であるため、接点を得られた場所において、ティップ電極とサンプル電極の結晶方位が一致していることはほとんどない。また、接点近傍では格子歪が大きいため、接点が細くなるにつれて、その歪緩和から接点が破断してしまうことが多く、単原子レベルの接点を得ることは困難であった。そこで、結晶方位を揃えるため、両電極間に12.9 mV印加しながら、ピエゾを用いて、ティップ電極をサンプル電極に対し押し込んだり、引っ張り出す過程を繰り返した。この過程を繰り返すことで、接点近傍での格子歪が緩和し、やがて、結晶方位が揃っていく傾向が見られた。さらに、接点近傍に残留していたコンタミが完全に除去された。この結果、原子レベルで安定した接点を得ることができた。ここで、接点近傍にコンタミがある場合、接点が融解してしまい、原子レベルの接点を得ることはできない。これは、コンタミによる電子散乱によりジュール熱が発生し、局所的に温度が上昇してしまうためと推測している。

4. 金ナノワイヤ構造の結晶方位依存性

上記方法を用いて形成した金接点は、主に金ワイヤの軸方向が $[001]$ 、 $[111]$ 、 $[110]$ 結晶方位となる構造になった。Fig. 5 (a)~(c)は、それぞれ、 $[001]$ 、 $[111]$ 、 $[110]$ 方位に平行な軸をもつ金接点の典型的なTEM像である。各TEM像の黒い点は、金原子、あるいは、電子線入射方位に沿って並んだ金原子列に相当する。Fig. 5 (a)は、結晶方位 $[001]$ に平行な軸をもつ電極の接点であり、短いナノワイヤである。この場合、電極の側面は、4つの $\{111\}$ 面からなっている。 $[001]$ 軸が4回対称性をもつことから、電極は、 (001) 層が積層してきたピラミッド形状であり、接点は、2つのピラミッドの頂点が接するところである。Fig. 5 (b)は、電極の

Fig. 5. (a) A typical TEM image of gold contact, which is parallel to the $[001]$ direction of the electrodes. A narrow neck is formed in the contact. The nets represent the position of the dark dots (gold atomic column) in the gold electrodes and contact. (b) Gold contact parallel to the $[111]$ direction of the electrodes. (c) Gold contact parallel to the $[110]$ direction of the electrodes. A long nanowire is formed in the contact.

結晶方位 $[111]$ に平行な軸をもつ接点であり、 $[001]$ の場合と同様に短いナノワイヤである。電極の側面は、3つの $\{111\}$ 面からなっている。 $[111]$ 軸が3回対称性をもつことから、この電極は、 (111) 層が積層してきた正四面体形状であり、接点は、2つの正四面体の頂点が接するところである。TEM像において電極側面が (001) 面として見えるのは、正四面体の側面ではなく、正四面体の稜を見ているためである (Fig. 5 (b) 下図参照)。Fig. 5 (c)は、電極の結晶方位 $[110]$ に平行な軸をもつ接点であり、長いナノワイヤになる。電極の側面は、2つの $\{111\}$ 面と2つの $\{001\}$ 面からなっている。2つの電極の接点間に長いナノワイヤができるのは、このワイヤが主に4つの $\{111\}$ 面で囲まれており、安定化していることを裏付けている。

すなわち、金接点は、最安定表面である (111) 面が優先的に現れる形状をとろうとしていることが特徴であり、ワイヤ軸に対し平行な (111) 面がない場合は、短いナノワイヤになると解釈できる。

5. 金ナノ接点構造とコンダクタンスとの関係

Fig. 6 (a)~(c)は、ナノワイヤ近傍の原子が拡散によって電極側へ移動することによって、 $[001]$ ナノワイヤがさらに細くなる過程を捉えた典型的なTEM像であ

Fig. 6. Time dependent structural change in a [001] nanowire. (a), (b) and (c) are TEM images, and (d) is the conductance curve and (e) its histogram. Each TEM image is taken at the time, which is shown at the lower left-side and indicated by a corresponding arrow in (d). The width of the nanowire in (a), (b) and (c) are 1.00, 0.86, and 0.72 nm, respectively.

り、接点におけるナノワイヤの幅が細くなる様子がわかる。Fig. 6 (d) に示すように、これらの像は、図中に示した時間で撮影し、また同時にコンダクタンス変化の測定をプロットした。Fig. 6 (a), (b), (c) と接点の幅は小さくなっており、断面積が減少していることがわかる。Fig. 6 (a), (b), (c) におけるコンダクタンスは、それぞれ、11.9, 9.2, 8.1 G_0 であり、このような規則的な構造をもつ場合のコンダクタンスは、量子化単位 G_0 の整数倍に近い値をとることがわかった。このような不連続なコンダクタンスの変化の途中では、コンダクタンスが連続的に変化する部分も観察される (Fig. 6 (d) 参照)。コンダクタンスが連続的に低下している様子を TEM 観察で調べると、接点を構成する原子が微小に変位していたが、詳細な対応関係はわからなかった。Fig. 6 (e) のコンダクタンス・ヒストグラムでは、12, 9, 8, 7, 5 G_0 にコンダクタンス・ピークを見ることができる。これらのコンダクタンスは、いずれも、半値幅約 0.4 G_0 をもっており、ブロードになっている。

Fig. 7 (a)~(c) は、典型的な [110] ワイヤが細くなる様子を示した TEM 像である。このナノワイヤは、長さがおよそ 1 nm である。ナノワイヤの幅が小さくなるにつれて、コンダクタンスが階段状に変化した (Fig. 7 (d))。Fig. 7 (a), (b), (c) におけるコンダクタンスは、それぞれ、15.2, 9.8, 7.9 G_0 であり、量子化単位 G_0 の整数倍に近い値をとる。コンダクタンスは、これら以外の値をとらない。Fig. 7 (e) のコンダクタンス・ヒストグラムでは、Fig. 7 (d) のコンダクタンス変化に見られるプラトーに対応するシャープなコンダクタンス・ピークを見ることができる。

Fig. 7. Time dependent changes in a [110] gold nanowire. (a), (b) and (c) are TEM images. (d) conductance change and (e) its histogram. The width of the nanowire in (a), (b) and (c) are 1.24, 1.21, and 1.0 nm, respectively.

電極と接点の形状を双曲線近似で表した場合、その形状は、最も細い部分の断面積と開き角の関数で表される。メゾスコピック理論によれば、開き角が小さい場合 (円筒に近い形状)、コンダクタンスは、断面積に対し階段状に変化するが、開き角が大きい場合 (円錐に近い形状)、コンダクタンスは、滑らかな変化となる²¹⁾。この計算結果は、実験結果と定性的に一致している。Fig. 6 (a), (b), (c) において、接点の幅は、それぞれ、1.0, 0.9, 0.7 nm であった。TEM 像からは、3 次元的な形状を確定することは難しいが、結晶の対称性やエネルギー的に安定な構造をとることを考えれば、接点の断面は円に近いと仮定できる。この仮定のもとでは、それぞれのコンダクタンスは、6, 5, 3 G_0 (実験値, 12, 9, 8 G_0) となった。同様に、Fig. 7 (a), (b), (c) において、計算より求まるコンダクタンスは、それぞれ、10, 10, 6 G_0 (実験値, 15, 10, 8 G_0) となった。これらの計算結果は、実験結果を定量的に説明することはできない。この原因として、接点における静電ポテンシャルの幅と TEM 像から求めたナノワイヤの幅に違いがあることがあげられる。特に、接点が短いナノワイヤの場合、電極の静電ポテンシャルの影響もあるため、両者の差が大きくなる可能性が高い。さらに、メゾスコピック理論では、電子状態の縮退によって、9 G_0 など取ることができない値がある。しかし、実験では、9 G_0 などの値が観測されている。したがって、実験結果を説明するには、メゾスコピック理論よりさらにナノ物性に適した理論が必要と思われる^{22~24)}。

これまでに、STM 法や MCBJ 法により金接点や金ナノワイヤのコンダクタンスが多数測定されてきた^{1~4)}。測定ごとにコンダクタンス変化が異なる理由は、ここで示したように、接点の結晶方位に依存した形状の違いに

よるものと考えられる。[001] ワイヤや [111] ワイヤの場合、接点は、短いナノワイヤとなり、そのコンダクタンスは、階段状の変化に加え、連続的にも変化した。つまり、ヒストグラムには、ブロードなコンダクタンス・ピークが現れる。一方、[110] ワイヤの場合、接点は、長いナノワイヤとなり、そのコンダクタンスが、階段状に変化した。つまり、ヒストグラムには、シャープなコンダクタンス・ピークが現れる。STM 法や MCBJ 法では、この両方が混在しているため、測定ごとに異なるコンダクタンス変化が観察されたと推測できる。

6. 結 言

今回、透過型電子顕微鏡と走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM) を組み合わせた手法 (TEM-STM 法) を開発し、金接点の構造とコンダクタンスの同時測定を行った。その結果、金接点の構造変化に伴うコンダクタンス変化を捉えることができた。金接点の構造は、電極の結晶方位に依存していた。電極 [001] および [111] 方位に平行な軸をもつ金接点は、短いナノワイヤとなる。この場合、接点が細くなる過程で、いくつかの規則的な構造をとり、コンダクタンスは、不連続に変化し、量子化コンダクタンスを示すとともに、その量子化コンダクタンスの値からずれた値もとることが観察された。一方、電極 [110] 方位に平行な軸をもつ金接点は、長いナノワイヤとなる。この場合、ナノワイヤの幅が細くなる変化に対し、コンダクタンスは、階段状に変化し、量子化コンダクタンスを示した。この場合、コンダクタンス値がある量子化コンダクタンスからずれることは観察されなかった。このような金接点の形状によるコンダクタンスの異なる振る舞いは、メゾスコピー理論と定性的に一致している。STM 法や MCBJ 法によって得られたコンダクタンス変化が測定ごとに異なるのは、測定ごとに金接点の形状が異なるためと推測される。

本研究は、高柳邦夫教授、平山博之助教授、大学院生毛利啓之助氏との共同研究によるものであり、ここに感謝の意を表す。また、本研究は、文部科学省の科学研究助成費、特別推進研究「量子コンタクト」の助成を受けて実施された。

文 献

1) N. Agraït, J.G. Rodrigo and S. Vieira: Phys. Rev. B **47**,

- 12345 (1993).
- 2) J.I. Pascual, J. Méndez, J. Gómez-Herrero, A.M. Baró and N. García: Phys. Rev. Lett. **71**, 1852 (1993).
- 3) L. Olesen, E. Laegsgaard, I. Tensgaard and F. Besenbacher: Phys. Rev. Lett. **72**, 2251 (1994).
- 4) J.M. Krans, C.J. Muller, I.K. Yanson, Th. C.M. Govaert, R. Hesper and J.M. van Ruitenbeek: Phys. Rev. B **48**, 14721 (1993).
- 5) D. Sánchez-Portal, C. Untiedt, J.M. Soler, J.J. Sáenz and N. Agraït: Phys. Rev. Lett. **79**, 4198 (1997).
- 6) J.C. Cuevas, A.L. Yeyati, A. Martín-Rodero, G.R. Bollinger, C. Untiedt and N. Agraït: Phys. Rev. Lett. **81**, 2990 (1998).
- 7) N. Kobayashi, M. Brandbyge and M. Tsukada: Phys. Rev. B **62**, 8430 (2000).
- 8) S.K. Nielsen, M. Brandbyge, K. Hansen, K. Stokbro, J. M. van Ruitenbeek and F. Besenbacher: Phys. Rev. Lett. **89**, 066804 (2002).
- 9) M.R. Sørensen, M. Brandbyge and K.W. Jacobsen: Phys. Rev. B **57**, 3283 (1998).
- 10) A. Hasmy, E. Medina and P.A. Serena: Phys. Rev. Lett. **86**, 5574 (2001).
- 11) M. Kuwabara, W. Lo and J.H.C. Spence: J. Vac. Sci. Technol. A **7**, 2745 (1989).
- 12) M. Iwatsuki, K. Murooka, S. Kitamura, K. Takayanagi and Y. Harada: J. Electron. Microsc. **40**, 48 (1991).
- 13) Y. Naitoh, K. Takayanagi, H. Hirayama and Y. Oshima: Surf. Sci. **433–435**, 627 (1999).
- 14) H. Ohnishi, Y. Kondo and K. Takayanagi: Nature **395**, 780 (1998).
- 15) T. Kizuka, K. Yamada, S. Deguchi, M. Naruse and N. Tanaka: Phys. Rev. B **55**, R 7398 (1997).
- 16) D. Ertz, H. Olin, L. Ryen, E. Olsson and A. Thölén: Phys. Rev. B **61**, 12725 (2000).
- 17) Y. Oshima, K. Mouri, H. Hirayama and K. Takayanagi: Surf. Sci. **531**, 209 (2003).
- 18) K. Takayanagi, Y. Kondo and H. Ohnishi: Proc. of Electron Microscopy and Microanalysis (1998) p. 701.
- 19) K. Hansen, S.K. Nielsen, M. Brandbyge, E. Lægsgaard, I. Stensgaard and F. Besenbacher: Appl. Phys. Lett. **77**, 708 (2000).
- 20) D.J. Bakker, Y. Noat, A.I. Yanson and J.M. van Ruitenbeek: Phys. Rev. B **65**, 235416 (2002).
- 21) J.A. Torres, J.I. Pascual and J.J. Sáenz: Phys. Rev. B **49**, 16581 (1994).
- 22) M. Okamoto and K. Takayanagi: Phys. Rev. B **60**, 7808 (1999).
- 23) N.D. Lang and Ph. Avoris: Phys. Rev. B **62**, 7325 (2000).
- 24) N. Kobayashi, M. Brandbyge and M. Tsukada: Phys. Rev. B **62**, 8430 (2000).