

professional report

走査プローブ顕微鏡による評価技術

ナノの世界を視る, 操る, 探る

Characterization Using Scanning Probe Microscopy
Nanoscale Observation, Fabrication and Mapping

橋詰 富博 Tomihiro Hashizume 平家 誠嗣 Seiji Heike

鋭く尖らせた探針をプローブとして試料表面の原子を観察するSTM(走査トンネル顕微鏡)と,STMから派生したSPM(走査プローブ顕微鏡)は,極微細化が進展するナノデバイスにおいて必須な評価技術と再認識されつつある。表面の原子をSTMで視ると,それぞれの物理現象に由来してさまざまな様相を示す。シリコン原子1個は,丸い電子雲として観察される。シリコン表面ですばやく拡散するガリウム原子は,棒状の突起として見える。水素原子でシリコン原子の結合を末端した表面では,STMの探針により,水素原子を一つずつ取り除くことができ,電子の理想的な一次元状態を構成でき,その構造緩和を視ることができる。

SPMを用いたレジストパターンング手法において,加工性や加工領域などの課題を解決する幾つかの技術開発を行い,汎用的な走査プローブ微細加工法を開発して,極微細電極パターンにより分子レベルの導電性を調べた。また,導電性探針を用いた走査ケルビンプローブ顕微鏡により,薄膜の膜厚,誘電体薄膜のリーク電流,有機半導体薄膜基板界面の電荷などをマッピングできる複合プローブを開発して,デバイス特性評価に活用している。

橋詰 富博

1994年日立製作所入社
基礎研究所 健康・計測ラボ 所属
現在, プローブ顕微鏡によるナノデバイス評価に従事
工学博士
応用物理学会会員, 日本物理学会会員



平家 誠嗣

1993年日立製作所入社
基礎研究所 健康・計測ラボ 所属
現在, 走査プローブ顕微鏡によるナノデバイス評価に従事
工学博士
応用物理学会会員



1 はじめに

走査トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscopy: STM)¹⁾⁻³⁾は,非常に鋭く尖(とが)らせた探針を試料表面から1 nmほどの距離に保持して,試料表面の凹凸を原子レベルの空間分解能で観察する顕微鏡で,半導体や金属の表面原子を個々に観察できる特徴により,最近,特に普及している顕微鏡である。STMは,Binnig(ビニツヒ)とRohrer(ローラー)により1982年に発明され,合金(CaIrSn₄)表面と金表面のトポグラフィ(凹凸像)が発表されていたが¹⁾,1983年にシリコン表面の再構成表面構造(7×7構造)が観察されたことにより,STMの最大の特徴である原子分解能が達成された²⁾。また,STMの探針により原子を一つずつ動かしたり表面から取り除いたりすることができる(原子操作)。

一般には,顕微鏡の空間分解能は用いている物理媒体

の波長で決まるという原理が成り立つ。例えば,光学顕微鏡では光の波長により分解能の限界が決まり,また,電子顕微鏡では電子の波長が電子の持つエネルギーに依存して短くなる原理を利用して,電子のエネルギーを増すことにより,高い分解能を得ている。ところが,対物レンズの代わりに波長よりもずっと小さな絞り(アパーチャ)を用いて,その絞りから染み出す(漏れ出す)物により試料表面の情報を得る(近接場顕微鏡)と,絞りの口径を小さくすればするほど,原理的に分解能が改善される。STMでは,探針先端の数個の原子が絞りとなり,そこから電子が染み出すことにより,高分解能が実現されている。このように,STMを代表として,電子,原子間力,光などの物理媒体が染み出す探針(プローブ)を試料表面で高精度に走査して,試料表面の物理情報を高い空間分解能で画像化する顕微鏡を総称して走査プローブ顕微鏡(Scanning Probe Microscopy: SPM)と呼んでいる³⁾。

一方、有機発光デバイス、有機太陽電池、有機トランジスタなどの、有機材料を用いた機能素子による有機ナノデバイスが最近再注目を浴びている。有機デバイスへの期待は、有機材料の持つ多様性と自由度に起因した革新的な特性を持つ材料が生み出される可能性にあると考えられる。現在よりもさらに軽くて薄い有機発光シートを用いた全天井型照明や、大面積で安価な壁紙表示など、有機材料に特有な、フレキシブルで環境に配慮した、しかも高性能なデバイスが期待されている。さらに、Feynman(ファインマン)が1960年に指摘していた原子レベルのメモリや、単独の分子を基本としたエレクトロニクスも、将来、飛躍的な発展の可能性を持っている⁴⁾。

こうした状況の中、石橋らは、SPMを用いたレジストパターンニング手法において、加工性や加工領域などの課題を解決する幾つかの技術開発を行い、汎用的なSP(Scanning Probe:走査プローブ)微細加工法を開発した⁵⁾⁻⁸⁾。すなわち、照射線量制御や光リソグラフィとの組み合わせ技術などにより、SP微細加工法が持つナノスケール加工能力に加えて、パターンの均一性や制御性の向上、加工領域の大幅な拡大が可能となったのである。SP微細加工法では、近接したパターンでの照射線量の干渉である、いわゆる近接効果の影響をほとんど無視できること、大気下動作が可能であること、取り扱いの簡便性、低コストなどの有利な点もあり、ナノテクノロジー研究の推進に有効な装置であると考えている。SP微細加工法を応用して2端子/4端子極微細電極の調整、および、高分子ナノワイヤの電気伝導度評価が可能となった。

また、高分子や分子結晶と電極や酸化膜との相互作用は、OTFT(Organic Thin-film Transistors:有機薄膜トランジスタ)の特性に関して重要な役割を担っていて、これらの界面を評価・制御して高性能なTFTを開発できると期待されている。有機トランジスタの実用化に向けて解決すべき重要な課題としては、電極金属-半導体間の電荷注入障壁による移動度の低下、および、ゲート絶縁膜-半導体界面の電荷トラップによる電圧しきい値のシ

フトの2点が挙げられる。電荷注入障壁は、ボトムコンタクト型のOTFTに対して走査ケルビンプローブ顕微鏡を用いることにより、電位分布として評価することが可能である。この方法は動作中の電子デバイス評価に対して非常に有力な手法として注目されており、有機デバイスにおける接触抵抗などの評価に活用できる。

ここでは、STMで視(み)た原子の例、原子操作例を挙げ、SP微細加工法の特徴、最近の研究として、走査ケルビンプローブ顕微鏡によるOTFTにおける界面の評価について述べる。

2 止まっている原子と動いている原子のSTM像

STMでは、金属の探針を試料表面から1 nm程度の距離に近づけ、両者の間に電圧差を与えてトンネル電流を計測する。トンネル電流は探針-試料間の距離変化に非常に敏感であるので、探針を試料表面に沿って走査しながらこの敏感な電流変化を測定することにより、原子レベルの空間分解能を有する顕微鏡となる。試料の面内の分解能は0.1 nm程度で、凹凸方向の分解能も0.001 nm程度ときわめて高い(図1参照)。

STM像が表面の原子の凹凸をイメージングしているのではないということはいくよくよく理解されている。実際には、

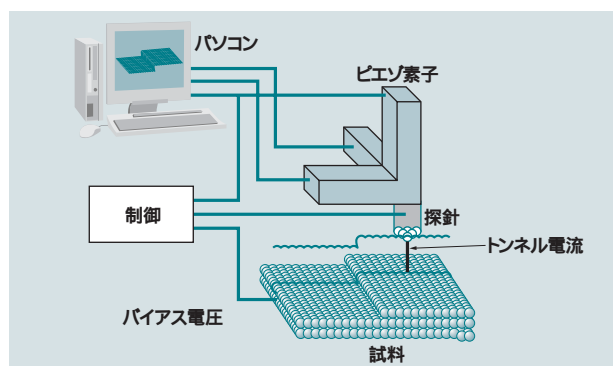


図1 STM(走査トンネル顕微鏡)の原理

探針-試料間にバイアス電圧を印加して流れるトンネル電流を一定に保ちながら探針をラスタ走査することにより、試料表面の電子状態をマッピングする。

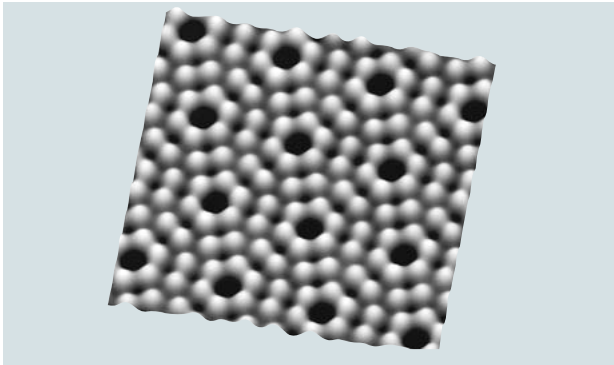


図2 シリコン原子のSTM像
シリコン原子が規則的に配列したシリコン(111)表面のSTM像では、個々の固定されたシリコン原子がテニスボールのように丸く見える。これは、このシリコン原子の電子(電子の雲)が球状の対象性を持つ電子で特徴づけられるためである。

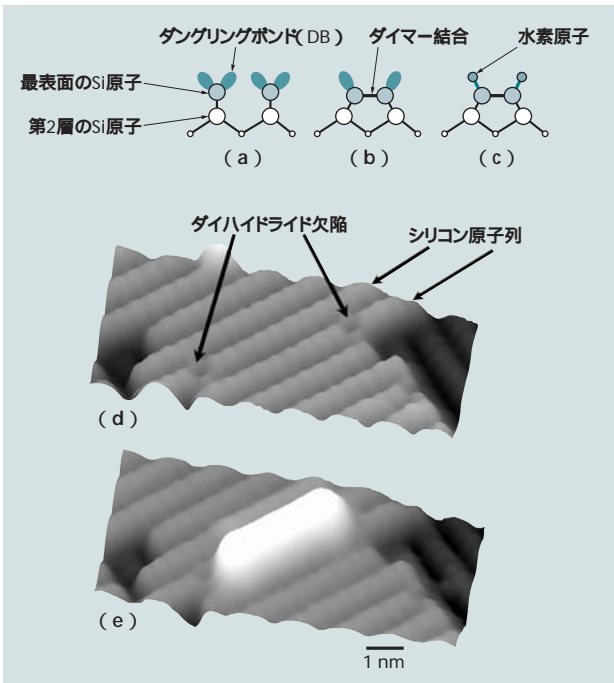


図3 水素終端シリコン表面とガリウム原子のSTM像
シリコン(100)表面ではシリコン原子1個に対して2個の結合が切れている(ダングリングボンド)(a)のでエネルギー的に不安定で、2個のシリコン原子が結合したダイマーを形成して安定化する(b)。さらに、水素原子を吸着すると、残ったダングリングボンドと結合して水素終端されたダイマーを形成する(c)。この表面に100 K程度の低温でガリウム原子を吸着すると、シリコン原子列とダイハイドライド欠陥により囲まれた溝(d)にガリウム原子が閉じ込められ、一方に動きながら棒状のガリウム・バー構造としてSTM観察される(e)。

表面の原子に起因する電子状態(電子の密度)の空間分布をマッピングしている。電子の分布は物理的には電子の存在確率分布で表され、電子が雲のように分布していると考えることができる(図2参照)。また、STMでは、試料バイアス電圧を変えることにより、電子状態を見る条件と空の電子状態を見る条件が選択できる。

視ている原子が動いている場合には、電子の空間分布の時間平均を考慮する必要がある。すなわち、STMの制御回路の時定数と比べて、電子の電子状態密度や凹凸が時間的に変化する系を観察すると、STM像はその時間平均を表すようになる。

シリコン(100)表面は、理想的にはシリコン結晶を結晶面(100)の方向に切った構造をしているが、実際には切断されたシリコンの結合(ダングリングボンド)が存在するため表面構造が変化して、表面のシリコン原子2個が結合したダイマーを形成して、できるだけエネルギー的に安定な構造になっている[図3(a)(b)参照]。水素分子を加熱したタンゲステンフィラメントで処理すると水素原子を生成できるが、この水素原子を吸着することにより、シリコンダイマーの残ったダングリングボンドに水素原子が結合した水素終端シリコン表面ができる[図3(c)(d)参照]。

この水素終端シリコン(100)表面にガリウム原子を極微量蒸着した後に得られるSTM像が図3(e)である。このとき、基板温度は約100 K(-173)に冷却している。同図(e)では、ガリウム原子は見られず、代わって棒状構造(以下、ガリウム・バー構造と言う。)が観察される。このSTM像を見る限り、表面上に複数のガリウム原子が並んで鎖構造を作ったと考えるのが妥当だろう。しかし、以下に述べるように、同図(e)に見られる棒状構造は、一つのガリウム原子が一方向に制限されたポテンシャル井戸の中に閉じ込められ、その中で動き回っている様子を捉えたSTM像であることがわかった。

これらのガリウム・バー構造は、常にシリコン原子列(実はシリコンダイマー列)に平行に形成され、かつ、二

つの原子列間の谷に位置している〔同図(d)参照〕。長さは2 nmから10 nmまでのバリエーションがあり、その高さは長さに依存し、長くなるほど低く見えるが、平均は約0.3 nmである。一つのカリウム・バー構造を連続的に測定すると、あるSTM像ではカリウム・バー構造が消えたり、またある像では一部分が消滅していたり、多彩なSTM像が得られた。そして注意深くこの構造を観察すると、時には表面の原子列間の谷から谷へホップするような奇妙なSTM像も得られた。

カリウム・バー構造は、STM探針に電圧パルスを印加すると消すこともでき、実は、同図(d)は同図(e)のカリウム・バー構造を消し去った後に観察されたSTM像である。このSTM像に示されているように、カリウム・バー構造は、ダイハイドライドと呼ばれる表面欠陥と同じ、または、隣のシリコン原子列に存在するときには観察され、また、カリウム・バー構造の長さはダイハイドライド欠陥の距離で決まっていることがわかった。さらに、大型計算機による計算機シミュレーションにより、1個のカリウム原子がこの表面で吸着する位置、隣のダイマー位置や隣の原子列に移動するときに必要なエネルギー、ダイハイドライド欠陥を乗り越えるのに必要なエネルギーなどを見積もり、この温度でのカリウム原子の動きとSTM像解釈が矛盾なく説明できることがわかった⁹⁾。

3 原子操作によるダングリグボンド細線

STMの探針直下の原子は、1個の原子で1 nA程度の電流(10^6 A/cm²程度の電流密度)に、また、1~2 V/nm程度の電界(電子が電界放出する電界の数分の1程度)にさらされている。そのため、通常のSTM観察時の電圧・電流条件を数倍程度にすることにより、試料表面や探針先端の原子が引き剥(は)がされたり移動したりしてしまう(原子操作)¹⁰⁾。

実際には、原子スケールの構造物を制御性よく作るためには、非常に繊細な探針さばきが必要とされる。水素

終端シリコン(100)表面の水素原子を原子操作により1列引き抜いた結果、1原子幅の人工ダングリグボンド細線が形成できた〔図4(a)参照〕。このとき試料は100 K程度に冷却され、試料バイアス電圧 $V_s = +2.8$ Vを試料・探針間に印加して、トンネル電流(I_t)を900 pAで固定して、以下の手順で探針を移動させることにより1原子幅のダングリグボンド細線を作成した。

まず、水素を引き抜きたい場所を十分拡大して表面をSTMで観察する。そして、どの場所からどの場所まで水素を引き抜くか、STM像上の2点を指定する。電流および電圧値を設定した状態で、トンネル電流を一定に維持するためのフィードバックを切り、探針が指定した経路上を通るように、5 nm/s程度の速度で表面に並行に移動

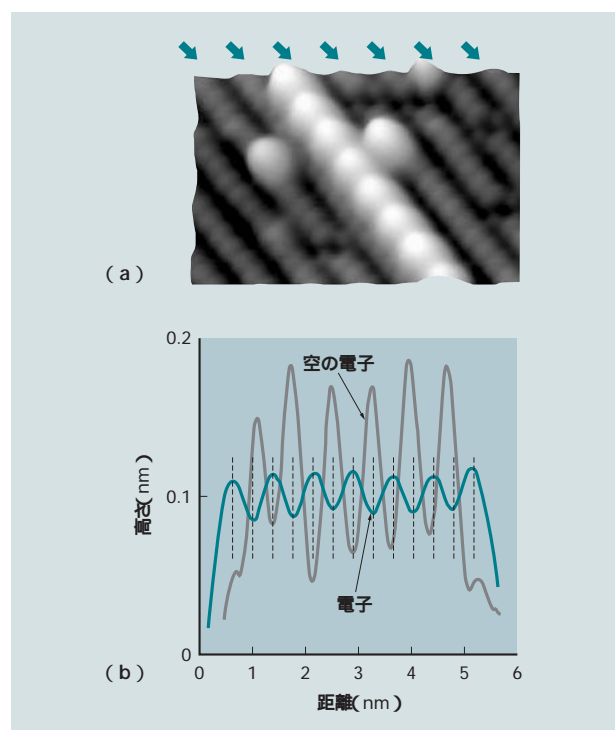


図4 原子操作で形成したダングリグボンド細線

水素終端したシリコン(100)表面において、STMの探針を用いて水素原子を1列引き抜がして、ダングリグボンド細線を形成した(a)。このようなダングリグボンドは理想的に1列の構造をしているが、STMで電子状態を視ると1個おきのダングリグボンドに電子が詰まっていて、逆に、空の電子状態は電子が詰まっていないダングリグボンド位置でピークを持っている(b)。

させる。このとき、あらかじめ測定した熱ドリフト量を計算に入れ、試料・探針間隔を必ず一定値に保つように調整しながら探針を移動させる。

この手順の特徴は、探針を移動させているときにフィードバックを切るといふ点である。探針直下の水素原子が抜けてダングリングボンドが生ずると、フィードバックをかけたままではトンネル電流を一定に制御するため、探針は、ダングリングボンドの高さ分だけ試料面から離れてしまう。そしてその隣の水素原子には十分な電流および電圧値が印加できず、水素原子が引き抜けないことになる。

図4(a)のSTM像で、まゆ状のシリコンダイマーやダイマー列が明瞭(りょう)に観察されている。白く表示されている領域は、表面の電子状態が大きな部分に相当し、この図ではダングリングボンドに対応している。図中の矢印は、ダイマー列の中心線を示す。ダイマー列中のダングリングボンドの位置に着目すると、この図の場合にはダイマー列の左側に1列配列したダングリングボンド細線が形成されていることがわかる。この図では15個のダングリングボンドが並んでいるはずであるのに、八つのピークしか見えていない。

図4(b)は同様に形成したダングリングボンド細線の断面図を示している。このダングリングボンド細線は13個のダングリングボンドから形成されていて、13個のピークが観察されることが予想できるが、実際には電子のピークは七つしか観測されない。バイアス電圧を変えて空の電子状態を視ると、電子のピーク間のダングリングボンドの位置に六つのピークが観察できる。この断面図から、ダングリングボンド細線では電荷の再分布が起きていることがわかる。実は、このようなダングリングボンド細線は、理想的には、ダングリングボンド1個に電子1個が配置した一次元金属構造と見なすことができ、電子とフォノンの相互作用により格子が歪(ひず)み、金属半導体転移を起こしてエネルギー緩和が行われる。すなわち、Peierls(パイエルス)により一般的に説明され

た一次元金属に関する物理現象そのものがSTMで観察されているのである。

4 SP微細加工法によるレジストパターン

SP微細加工法の原理を図5に、本体部の外観を図6に示す。SP微細加工法では、レジスト膜を通過する電流を用いてレジストパターンを形成する。この電流は、導電性探針から電界により放出する電子によると考えられ、一定の電圧を印加するだけでは、探針の先端形状の変化やレジストの膜厚や特性の不均一さに起因して照射線量が一定にならないため、パソコンによって照射線量をフィードバック制御することにより均一性・再現性の高いパターン形成が可能となった(図5参照)⁵⁾。

使用しているレジストは、ベース樹脂と感光剤を混合したタイプの電子線描画装置用ネガレジストである。このタイプのレジストでは、通常は、光や電子線の照射を受けた感光剤が、アルカリに可溶性のベース樹脂と反応して、ベース樹脂を不溶化することによりネガレジストとして機能する。一方、SP微細加工装置の場合、典型的には50 nmのレジスト膜に50 V程度の電圧を印加している。このとき電界が集中している探針先端から電界放射された電子は、最初はエネルギーを持っていないが、レ

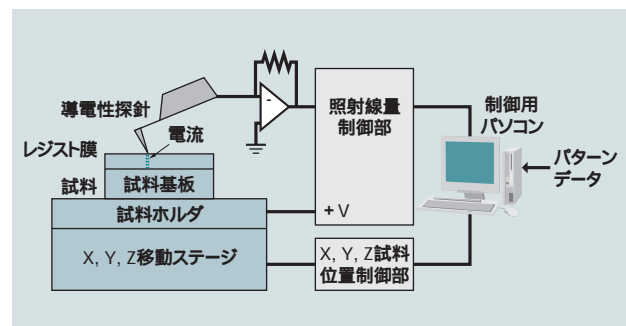


図5 SP (走査プローブ) 微細加工法の原理

導電性探針と試料基板間に印加した電圧により、レジストを通過する電流を用いてレジストパターンを形成する。このとき、パソコンによってレジストへの照射線量をフィードバック制御することにより、均一性・再現性の高いパターン形成が可能となっている。

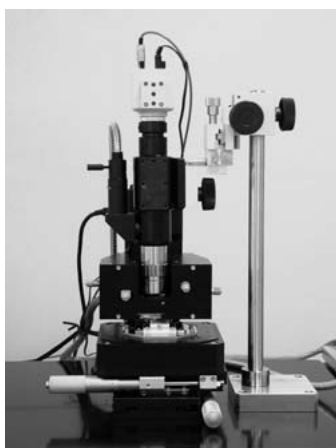


図6 SP微細加工装置本体部

装置全体は本体部を小型のテーブル型除震台上載せ、パソコンラックを横に置いただけの構成となっていて、占有面積も小さい簡便な装置になっている。

ジスト中の2~3 nmの距離を移動する間に、レジスト中の電界により、7~8 eVのエネルギーを持つようになり、ベース樹脂に散乱されるようになる。このとき、直接、ベース樹脂を架橋、高分子化して照射領域のレジストを不溶化すると考えられる。このため、使用できるレジストは、上述のように電子線照射によるベース樹脂の不溶化を誘起できるタイプのもの、例えば、ノボラック系レジストであれば、基本的には使用可能であると考えられる。

試料基板のX、Y、Z方向の位置制御には、 piezoelectric素子のクリープ補正機構が付随したX Y Zステージを採用している。X Y領域の走査領域は、200 μm x 200 μm である。さらに広い領域を描画するためには、フォトリソグラフィとの複合方式を用いる⁷⁾。われわれは、探針の走査方法として、ラスタースキャンとベクトルスキャンの2種類を描画パターンに応じて適宜選択している⁸⁾。

SP微細加工法を用いて調整した4端子極微細電極例を図7に示す。この例では、良好な絶縁体であるサファイア基板上に7 nm厚の白金薄膜を蒸着して、その上にスピン塗布したレジスト膜をSP微細加工法により描画して、そのレジストパターンにより4端子極微細電極を加工した。4端子極微細電極のAFM(Atomic Force Microscope :

原子間力顕微鏡)像が図7(b)である。このとき、SP微細加工装置のX Y領域の走査領域が200 μm x 200 μm であるため、広い領域を描画するために、フォトリソグラフィとの複合方式を用いている。すなわち、数mm x 数mmの大きさのコンタクトパッド(電気特性測定端子接続用:同図には示されていない。),および、コンタクトパッドと極微細電極との接続のための50 μm 幅の電極[図7(a)]は、光リソグラフィにより潜像パターンを形成する。そのパターンをわずかに現像し、パターン境界に数nm程度の段差を形成しておき、それをSP微細加工装置のAFMモードで観察して、4端子極微細電極用レジストパターンのための位置合わせを行う⁷⁾。その様子が図7(a)の中央部に模式的に示されている。

高分子ナノワイヤや高分子単体の電気特性評価を行うためには、コーミング法などにより極微細電極上に高分子ナノワイヤや高分子単体を配置して、それらが電極に乗っているかどうかをAFMで確認する必要がある。そのため、調整する極微細電極の表面がきわめて平坦であることが必須となるが、この手法で調整した極微細電極では、電極と基板表面の凹凸が1 nm以下であることが確認できた。この極微細電極基板は、高分子単体や高分子ナノワイヤの導電率測定に用いられてその有効性が確認されている¹²⁾⁻¹⁵⁾。

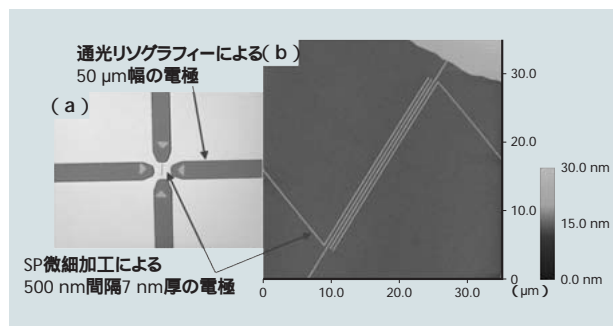


図7 SP微細加工法を用いて調整した4端子極微細電極例

(a) 光学顕微鏡像: 光リソグラフィによる50 μm 幅の電極パターンをわずかに現像して得られるレジストの厚さの差が観察されている。中心部には、SP微細加工法により、描画するパターンが模式的に描かれている。(b) AFM像: 右上には50 μm 幅の電極の一部が観察されている。

5 走査ケルビンプローブ顕微鏡による界面評価

OTFTの実用化に向けて解決すべき重要な課題として、電極 半導体間などの界面における電位降下による移動度の低下、および、ゲート絶縁膜 半導体界面の電荷トラップによる電圧しきい値のシフトが挙げられる。これらの課題に対して走査ケルビンプローブ顕微鏡 (SKPM: Scanning Kelvin Probe Microscope) (以下、ケルビンプローブと言う。)を用いた界面評価法を開発している。

ケルビンプローブは、AFMをベースにして、探針と試料表面の電位を一致させながら探針を走査することにより、試料表面の電位分布を可視化する手法である。試料表面と探針に電圧が印加されている場合、両者の間には電位差の二乗に比例したクーロン力が働く。ここで、探針電圧に微小な交流電圧を重畳してやるとクーロン力も変調され、その変調振幅はクーロン力の探針電圧に関する1次微分に比例した量となる。クーロン力の変調振幅が最小のとき、クーロン力が最小、すなわち、探針電圧と試料表面電位が一致する。そこで、クーロン力の変調振幅をカンチレバーの撓(たわ)みとしてロックインアンプなどにより検出し、その振幅が最小となるように探針電圧をフィードバック制御することにより、探針の電位

を試料表面電位と常に一致させることができる。各探針位置での探針電圧をマッピングすることにより表面電位分布が得られる(図8参照)。

ケルビンプローブには通常のレーザーダイオードおよびフォトディテクタによるカンチレバー変位検出方式を用いた。また、電位分布および電荷分布の測定が真空中で可能となるように、AFMはタッピングモードにより動作させた。制御システムは、フィードバックと電位分布測定ケルビンプローブの二つの制御系から構成され、それぞれ独立に動作する。ケルビンプローブ動作は、探針電圧を周波数で変調し、ロックインアンプにより検出されたクーロン力の成分の振幅がとなるように、探針電圧を操作することにより行う。これにより、探針電圧と試料表面電位は常に一致し、探針電圧をモニタすることで試料表面の電位がわかる。これらのフィードバック制御、およびロックインアンプ動作はすべてソフトウェアにより行っている。

今回用いたOTFTは、厚さ250 nmの熱酸化膜付きのシリコン基板上にソースおよびドレイン電極として金薄膜をバタニングした基板に、有機半導体であるペンタセンを回転塗布することにより作製した。また、ゲート電極として下地のシリコン基板を用いた。

ケルビンプローブによるOTFT評価例として、ここでは、チャンネル内にクラックを持つOTFTの測定例を紹介する。チャンネル内に欠陥がある場合にその影響を電位プロファイルの変化として観察できる。図9はAFM像(上)および同時に測定された破線位置での電位プロファイル(下)である。測定された見かけの移動度が高いOTFTと低いOTFTを評価して、それぞれ3か所を評価した。

見かけの移動度が低いOTFTでは、いずれの電位プロファイルにも、同図の矢印で示した個所に不連続な段差が存在しており、急激な電位降下が生じていることがわかる。AFM像中に矢印で示した段差個所に相当する位置には、線状の盛り上がりや溝状の構造が見えているが、これらはいずれも乾燥時に結晶に生じたクラックである

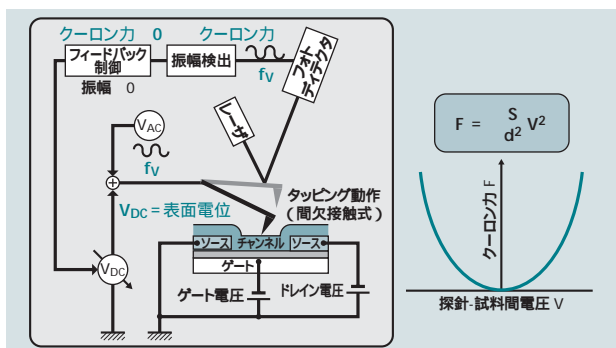


図8 走査ケルビンプローブ顕微鏡の原理

試料表面と探針間に電圧を印加すると、両者間には電位差の二乗に比例したクーロン力が働く。探針電圧(直流成分)に微小な交流電圧を重畳するときのクーロン力の変調振幅を0にするように探針電圧を制御すると、クーロン力は最小になり探針電圧と試料表面電位が一致する。各探針位置での探針電圧をマッピングすることにより、表面電位分布が得られる。

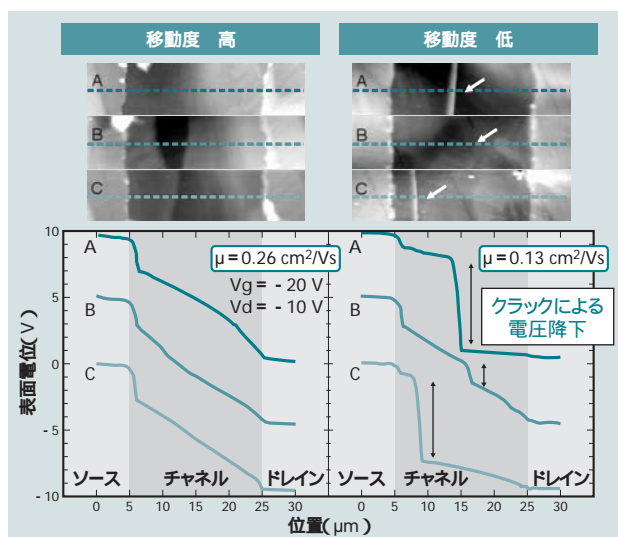


図9 走査ケルビンプローブ顕微鏡によるトランジスタ評価例

OTFT (有機薄膜トランジスタ) でチャンネル内に欠陥がある場合、その影響は電位プロファイルの変化として明瞭に観察できる。AFM像 (上) は OTFT のチャンネル部分の凹凸を示して、同時に測定された破線位置での電位プロファイル (下) を見ると、移動度が低い OTFT (右) において、矢印で示した個所に不連続な段差が存在しており、急激な電圧降下が生じていることがわかる。

と思われる。このAFM像では盛り上がっているように観察されているが、これは急激な電圧降下に対しケルビンプローブのフィードバックが追従できず、探針試料間に電位差が生じたためである。クラックのない OTFT の特性と比較したところ、クラックにより移動度が半分程度に低下していることがわかった。

6 おわりに

ここでは、走査トンネル顕微鏡 (STM) を含めた走査プローブ顕微鏡 (SPM) による研究例について述べた。

走査プローブ (SP) 微細加工は、大気中で動作することや構成が比較的単純であり、取り扱いや改造が容易であるので、簡便に使用できる。描画可能面積はそれほど大きくはないものの最小加工寸法は電子線露光装置とほぼ同等であり、比較的安価であることからナノテクノロジー基礎研究用としては利便性の高い装置であると考えてい

る。走査ケルビンプローブ顕微鏡は、表面電位マッピングにより電極-半導体界面やチャンネル内欠陥による電位降下を評価できる。最近、有機薄膜トランジスタの半導体-ゲート絶縁膜界面におけるトラップ電荷密度分布の観察も始めていて、OTFT特性の不安定要因の一つが解明できる可能性があると考えている。今後、トラップ電荷の挙動の詳細な解析や、ゲート絶縁膜の表面処理、雰囲気制御などによる影響の評価により、トラップサイトおよびトラップメカニズムの解明が期待される。

最後に、共同研究に関して、東京大学大学院新領域創成科学研究科伊藤耕三教授、および関係者の方々に深く感謝の意を表す。

参考文献など

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, Appl. Phys. Lett. 40, 178 (1982); Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982); G. Binnig and H. Rohrer, Helvetica Physica Acta, 55, 726 (1982)
- 2) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 50, 120 (1983)
- 3) 桜井, 外: 表面を見る 走査トンネル顕微鏡の最近の話題, 大槻義彦編, 物理学最前線, 29巻, pp.123-215, 共立出版 (1992)
- 4) R. Feynman, "There's Plenty of Room at the Bottom," Invited talk at the Jet Propulsion Laboratory (Feb. 1960), reprinted in J. Microelectromechanical Systems, 1, 60 (1992)
- 5) M. Ishibashi, S. Heike, H. Kajiyama, Y. Wada, and T. Hashizume, Appl. Phys. Lett. 72, 1581 (1998)
- 6) M. Ishibashi, N. Sugita, S. Heike, H. Kajiyama, and T. Hashizume, Jpn. J. Appl. Phys. 38, 2445 (1999)
- 7) M. Ishibashi, S. Heike, and T. Hashizume, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 7060 (2000)
- 8) M. Ishibashi, S. Heike, and T. Hashizume, Jpn. J. Appl. Phys. 41, 4395 (2002)
- 9) T. Hitosugi, Y. Suwa, S. Matsuura, S. Heike, T. Onogi, S. Watanabe, T. Hasegawa, K. Kitazawa and T. Hashizume, Phys. Rev. Lett. 83, 4116 (1999)
- 10) D. M. Eigler and E. K. Schweizer, Nature 344, 524 (1990)
- 11) T. Hitosugi, S. Heike, T. Onogi, T. Hashizume, S. Watanabe, Z.-Q. Li, K. Ohno, Y. Kawazoe, T. Hasegawa, and K. Kitazawa, Phys. Rev. Lett. 82, 4034 (1999)
- 12) D. M. Eigler and E. K. Schweizer, Nature 344, 524 (1990)
- 13) T. Akai, T. Abe, T. Shimomura, M. Kato, M. Ishibashi, S. Heike, B.-K. Choi, T. Hashizume, and K. Ito, Jpn. J. Appl. Phys., 42, 4765 (2003)
- 14) J. P. Hill, W. Jin, A. Kosaka, T. Fukushima, H. Ichihara, T. Shimomura, K. Ito, T. Hashizume, N. Ishii, and T. Aida: Self-Assembled Hexa-peri-hexabenzocoronene Graphitic Nanotube, Science, 304, 1481 (2004)
- 15) M. Fujimori, S. Heike, Y. Terada, and T. Hashizume: Fabrication of four-probe fine electrodes on an atomically smooth Si (100) -2x1-H surface, Nanotechnology, 15, S333 (2004)
- 16) A. Inomata, T. Shinomura, S. Heike, M. Fujimori, T. Hashizume, and K. Ito, J. Phys. Soc. Jpn. 31, 074803 (2006)