

原子レベルの計測と制御

Measurement and control in the atomic level

川 勝 英 樹*

Hideki KAWAKATSU

1. は じ め に

本解説では、走査型プローブ顕微鏡に関連のある、微小領域の可視化技術で、著者らの開発したものを報告する。走査型プローブ顕微鏡は、1981年頃、G. Binnig, H. Rohrerらにより発明された走査型トンネル顕微鏡¹⁾に端を発している。この顕微鏡は、鋭利な導電性探針を導電性試料に近づけ、探針と試料の間に電位差を与えることによりトンネル電流が探針と試料の間に流れることを応用したものである。このトンネル電流は試料の状態と、試料探針間距離（以下ギャップ）に影響されるため、トンネル電流が一定となるようにギャップをピエゾ素子などで制御しながら試料や探針をラスタ走査することにより試料表面の状態や形状がマッピングできるものである。機械的な探針の走査によって原子レベルの分解能が得られることは画期的であり、その後各種物理量を探針で計測しながら走査を行う走査型プローブ顕微鏡が開発された。現在、力、光、静電容量、磁力などを一定に保ちながら探針を走査する手法が派生している^{2)~19)}。本報告では、マイクロマシンを中心として、走査型プローブ顕微鏡に関連のある技術を紹介する。

2. 摺動面の軌跡の可視化

走査型力顕微鏡においては、通常長さが200 μm 、幅20 μm 程度の短冊形カンチレバーを力検出素子として用いている。カンチレバーの先端には高さ3 μm 程度のピラミッド状の探針が固定されており、探針先端と試料との間に作用する力はカンチレバーの変形として検出される。変形の検出には、図1 (a), (b) に示す、光てこ機構やレーザ干渉計が広く用いられている。この場合、問題となるのは、光てこ1個や、レーザ干渉計1個では、探針に作用するベクトルとしての力の大きさと方向や、探針の軌跡が知り得

ないという点である。例えば、図1で定義される座標系において、y方向及びz方向の力はいずれも θ_x を生じる。そのため、光てこで θ_x を計測していても、探針先端に接線力 f_y が作用したのか、法線力 f_z が作用したのかがわからない。この問題点に対しては、光てこを2個用いて、カンチレバーの異なる部分の角度変位を計測することが有効である。図1 (c) に光てこを2個有する走査型力顕微鏡を示す。2個のレーザ光源からでたビームはカンチレバー上で20 μm 程度の焦点を結び、それぞれの反射光は2個の4分割フォトダイオード上に落射する。4分割フォトダイオードの各象限の足し引きを行うことにより、反射スポットの変位を2自由度で計測可能である。結果的にカンチレバー上のスポットの位置でのカンチレバーの角度変位 θ_y と θ_x が計測される。

図2に、探針先端を、劈開した雲母結晶の表面に接触させ、探針と試料が相対変位を起こさない0.1 nm程度の振幅で試料を変位させたときの、光てこ系から計測される角度変位を示す^{20)~22)}。特に重要な結果は図2 (c), (d) の場合である。これらの結果はレーザスポットを一つはカンチレバーの先端近傍、もう一つは中央付近に設定し、試料をy及びz方向に三角波状に変位させた場合に与えられる。ここで θ_x のピエゾ駆動電圧との関係を見ると、y方向変位時は2個の光てこの極性が相反しており、z方向変位時には同相である。これは探針先端のy方向の変位によってカンチレバーがその長軸方向にまくれ込むことによって先端と中央付近で異なる方向に傾くことが検出されていることを意味している。探針の10 pmから100 pm オーダの変位が、比較的簡便な光てこ機構を2個用いることにより検出可能となっている。このように、探針先端のyおよびz方向の変位が分離して検出可能なため、探針先端のx, y, z方向への微小変位を2個の4分割フォトダイオードの出力から算出することが可能である。例として、図3に雲母を走査した場合の探針先端の位置を等時間間隔でプロットしたものを示す。図3 (a), (b) は吸着点の配列が

*東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター

x 方向と一致している場合、図 3 (c), (d) は一致していない場合を示す。前者の場合、探針先端は x 軸に沿って一種のスチックスリップを繰り返す。後者の場合、探針先端は吸着点の畝を辿ろうとはするが、数歩ごとに脱線を生じ、順次隣へと畝を乗り換えていく。マクロにみると x 方向の変位を生じるが、観察の分解能をあげると、このように原子レベルの蛇行挙動が可視化可能となる。この可視化でのキーファクターは、力もしくは変位検出素子であるカンチ

レバーが適度に小さい、という点である。比較的短いカンチレバーの先に固定した探針先端が 10 pm オーダの並進変位を生じると、マイクロからミリラジアンオーダの角度変位が生じ、それが光でこで検出可能な量となる。カンチレバーがより大きいと、変位の角度変位への変換係数は小さくなり、検出がより困難になる。この摺動面の軌跡の可視化技術は、雲母に限られるものではなく、各種薄膜や、self assembled monolayer (SAM) の摩擦現象の微視的観察

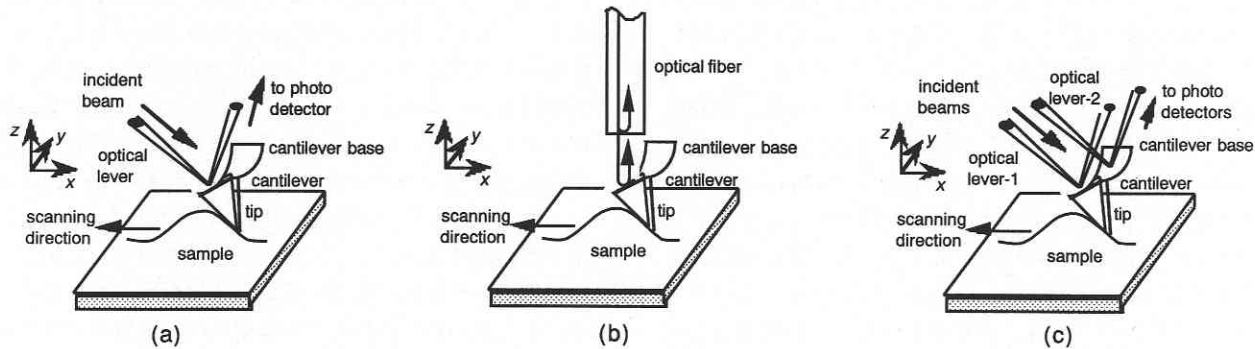


図 1 (a) 光てこによるカンチレバーの変位計測。(b) 光ファイバ式レーザ干渉計によるカンチレバーの変位計測。(c) 光てこ 2 個によるカンチレバーの変位計測。この方式ではカンチレバーの探針の xyz 方向の変位が計測可能である。

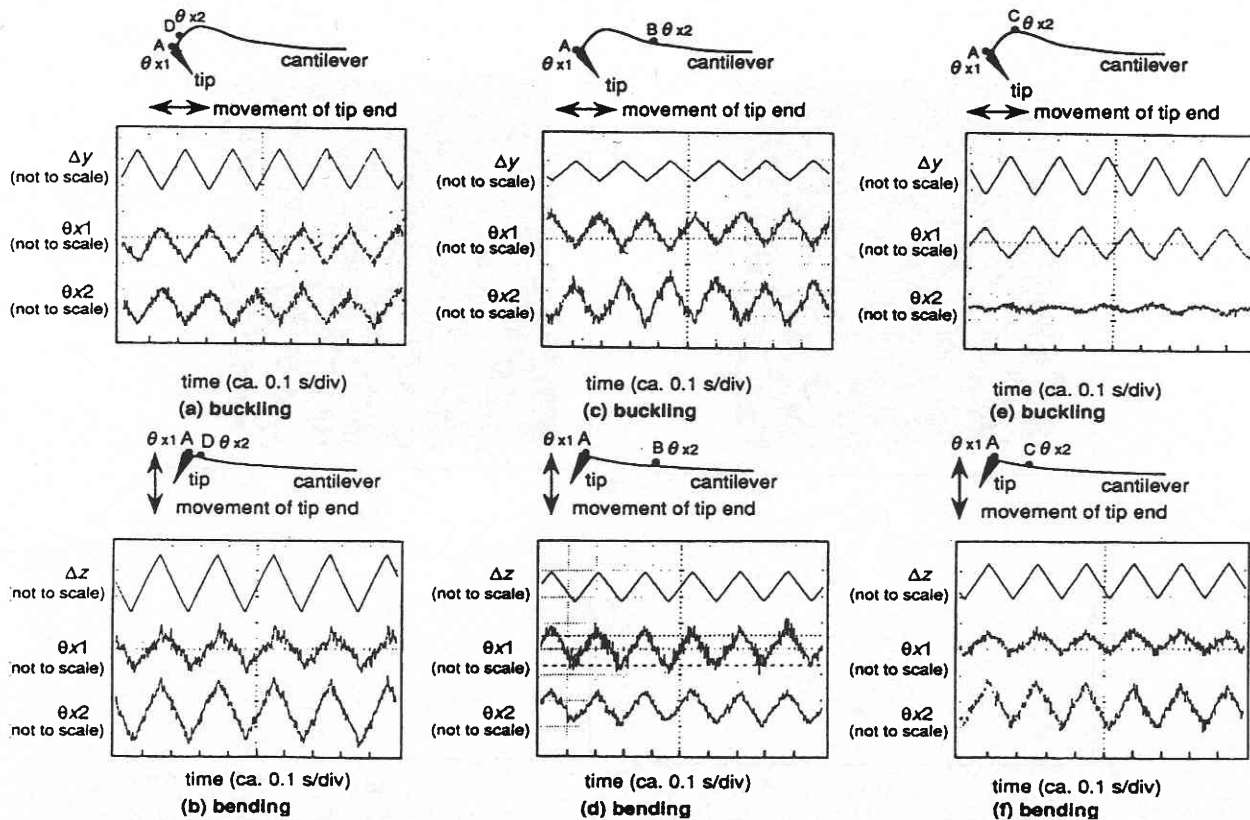


図 2 2 個のフォトダイオードで計測された θ_x の値。(a), (b) レーザの焦点がともにカンチレバー先端に当たっている場合の探針の y 及び、z 方向の変位に対する θ_x 。(c), (d) レーザの焦点がカンチレバー先端と中点近傍に当たっている場合の探針の y 及び、z 方向の変位に対する θ_x 。(e), (f) レーザの焦点がカンチレバー先端と、先端から 1/4 程度付け根側に当たっている場合の探針の y 及び、z 方向の変位に対する θ_x 。(e) の場合、付け根側の光てこは探針の y 方向の変化に対して鈍感になる。

に役立つ。

3. 原子レベルのドリフトフリー位置制御

走査型プローブ顕微鏡で試料の観察を行う際、試料から検出される信号が非常に弱い場合は信号の積分が必要になる。その場合に重要なことは、観察領域が変化しないか、変化を認識した上でそのずれを補正しながら信号の積分を行うことである。ドリフトが問題にならないような短時間の観察では可視化不能であった信号に対しても、サブ原子レベルでドリフトのない観察が実現できれば意味のあるマッピングが可能となる。本章では走査型トンネル顕微鏡を例に、探針と試料間に10 pm オーダのディザ振動^{(24), (25)}を印加することによって試料面方向にドリフトの無い位置制御を実現する手法を紹介する^{(26)~(31)}。図4に制御系を示す。探針と試料の間にピエゾ素子を用いて10 pm オーダのディザ振動を加える。ディザ振動の周波数としては、トンネル電流の一定制御の帯域よりも十分に高い値を選び、実験ではディザ振幅70 pmp-p, 3.3 kHzを用いた。このディザ振動によりトンネル電流が変調される。この変調成分とディザ振動をアナログ掛け算器で掛け合わせ、その出力をローパスフィルタに通すことにより、試料の微分像観察が

可能となる。図5は探針を一直線上に数 nm 往復させて得られた微分信号で、良好な微分信号が得られている。微分信号のゼロクロスは試料の極大点や極小点に対応する。そのため、微分信号に適切な係数をかけて積分し、それをディザ方向に対応するxもしくはyスキャナに帰還することによって、ゼロクロス点を維持する制御系が実現される。帰還係数の符号を選ぶことにより、凸部もしくは凹部への位置決めを行う制御となる。結晶として黒鉛結晶を用いた場合、凹部としてはホローサイト、凸部としてはベータサイトへの位置決め制御が可能となる。この制御方法を用いることにより、探針と試料の間の相対ドリフトをうち消す制御が実現される。また、結晶中で規則正しく並んだ原子の配列をサーボトラッキングすることにより、結晶の原子列をスケールとした歩進動作が実現される。図6に数歩の歩進動作を行った場合のx, yピエゾ素子の電圧のリサージュを示す。滞留点が結晶の周期構造に対応している。いままでの説明は探針1本に限ったものであった。実際に試料から得られる弱い信号を積分する場合は、試料面上にある、より強い信号の得られる特徴点への位置決めをフレームごとに行ってドリフトを補正するか、探針が対向したデュアルプローブ顕微鏡を用いて、相対ドリフト量を計測し

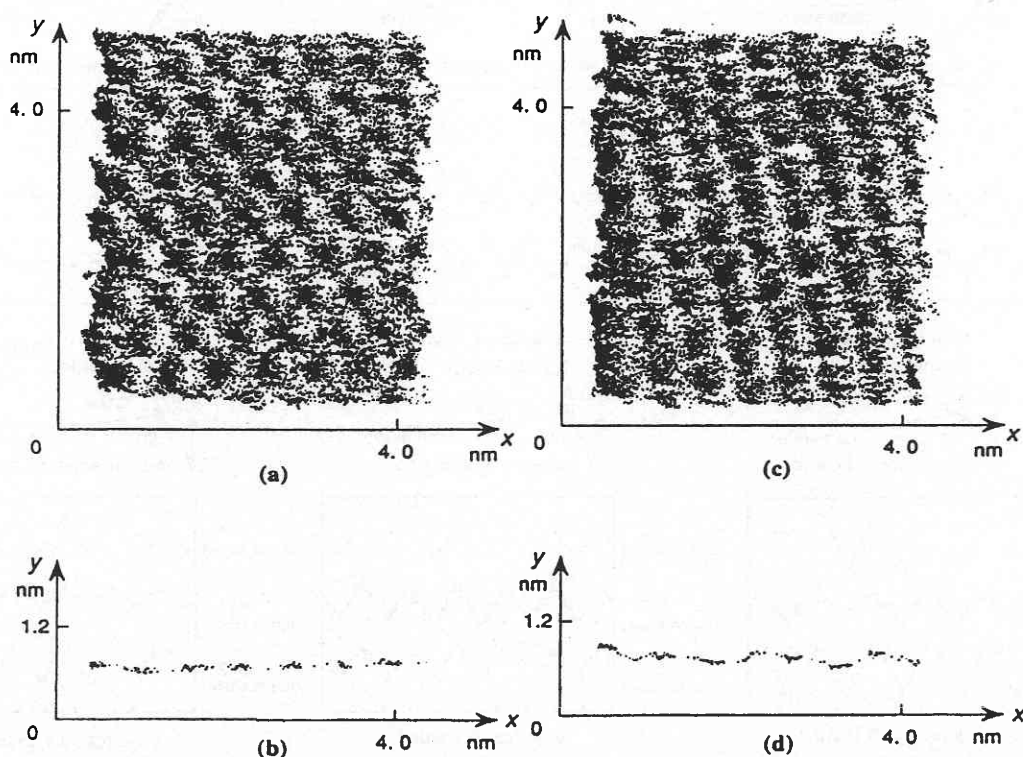


図3 (a), (c) カンチレバーの付け根をxy面内でラスタ走査した場合の探針先端の位置を等時間間隔でxy面にプロットした結果。試料は雲母。(b), (d) カンチレバーの付け根をx方向に変位させた場合の探針先端の軌跡。(a)と(b), (c)と(d)が対応する。(a)と(c)では、結晶がz軸周りに30度ほど回転している。結晶の方位による摺動面の軌跡がリアルタイムで可視化可能である。

ながら信号の積分を行う必要がある。

4. 走査型力顕微鏡の力検出素子の微小化による感度の向上

走査型力顕微鏡の作動モードの一つとして、力検出素子であるカンチレバーをその固有振動数近傍で振動させ、探針と試料との相互作用を周波数の変化として捉える手法がある。熱雑音で制限される自由振動子の最小検出可能力勾配は $f' = \sqrt{kKT/Q\omega}$ で与えられる⁶⁾。ここで f' は力勾配、 k は振動子のバネ定数、 K はボルツマン定数、 T は絶対温度、 Q は Q 値、 ω は振動子の角速度である。集中バ

ネ質量モデルの場合、固有振動数は $f \propto \sqrt{k/m}$ 、 m は振動子の質量で与えられるため、その場合の f' は他のパラメータを固定した場合、 $f' \propto \sqrt{k/m}$ で与えられる。つまり、振動子の質量とバネ定数を小さくすることが感度向上に有効である。また、質量変化の検出においても、 $\Delta m/m$ の分母となる振動子の質量 m を小さくすることは、より大きな周波数変化を得る上で有効である。質量は体積で利くため、カンチレバーの小型化により質量 m を大きく変化させることができる。バネ定数 k に関しては、観察目的にあった選定が必要となる。力検出分解能をあげ

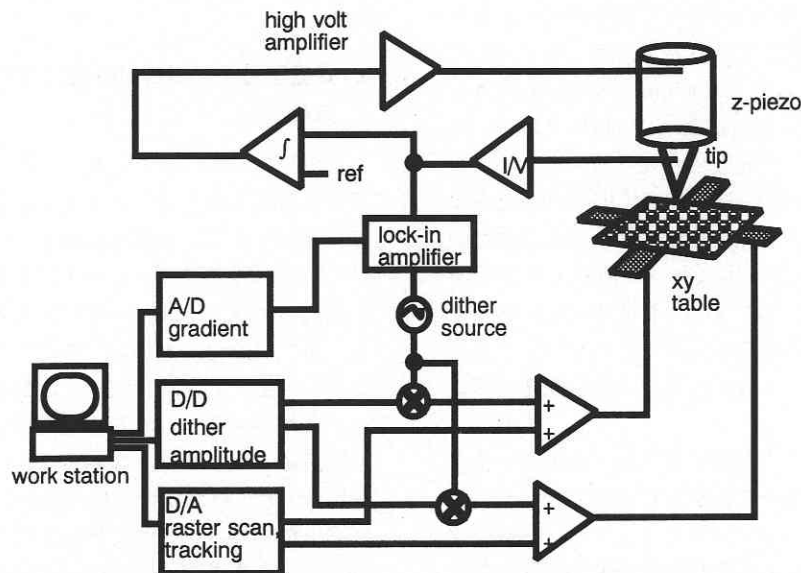


図4 走査型トンネル顕微鏡で、結晶を基準としたxy方向の位置決めを行うためのブロック線図。探針にx及びy方向のディザ振動を印加し、トンネル電流の変動分をロックイン検出する。これにより微分像が得られ、微分信号のゼロクロス点を維持するようにxyスキャナを制御すると、長時間の位置決めや、歩進動作を実現できる。

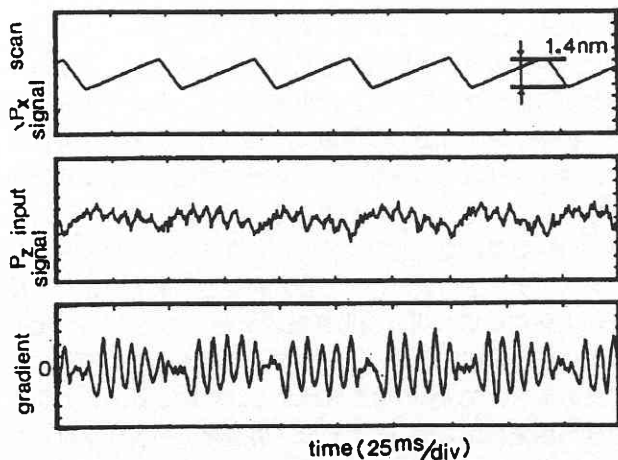


図5 上から、ワンラインスキャン信号、zピエゾ印加電圧、微分信号。微分信号のゼロクロスが結晶の極大点と極小点に対応する。

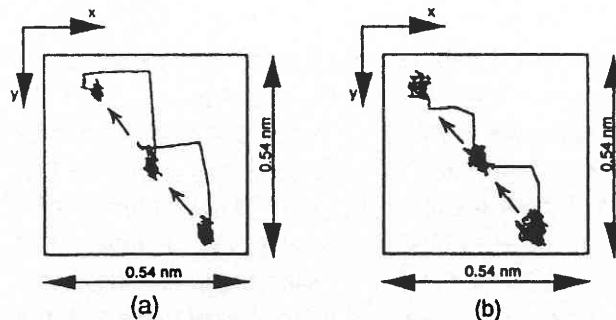


図6 探針が結晶格子を基準とした歩進動作をしているときの、x、yピエゾ素子に印加された電圧。(a)ステップが格子間隔よりも大きい場合。(b)ステップが格子間隔よりも小さい場合。

る必要があり、他の制約条件がない場合は、細く、長い頸部を有する振動子が好ましい。一方、測定したい場の力勾配との関係で、ある値以上 k を小さくできない場合、例えば、試料への探針のスナップインを防ぐ場合は、目安として 10 N/m 程度の剛性が必要となる。走査の高速化や分解能の向上を目的として、数 μm から数 $100 \mu\text{m}$ のカンチレバーが作製されている^{32)~39)}。

走査型力顕微鏡の他の作動モードとして接触モードがある。この場合、探針は試料表面に常時接触しており、カンチレバーの変位から作用力が推定される。また、試料を上下することにより一定の作用力を維持しながら像を取得する制御方法もある。接触モードにおいて走査速度を制限するのは、探針が試料に接触しているときのカンチレバーの固有振動数であり、例えば長さ $200 \mu\text{m}$ 、幅 $20 \mu\text{m}$ のカンチレバーの試料接触時の固有振動数は 200 kHz である。原子レベルでの摩擦現象の走査速度依存性を調べるために走査速度を高めると、この固有振動数が観察の限界を与える。このため、力検出素子の小型化とそれに伴う固有振動数の増加は、より早い現象の可視化にとって極めて重要である⁴⁰⁾。また、第1章で述べたように、並進変位を角度変位に変換する場合、小さい素子を用いることによって、より大きなてこ比が得られる。これは検出側の分解能を高めるうえで有効である。

ナノメートルオーダの微小振動子を作製する場合、その作製プロセスを含めて振動子に要求される項目を以下に列挙する。

- (i) 10 nm 大から $1 \mu\text{m}$ 大程度の振動子を作製可能であること。
- (ii) リソグラフィ装置の性能に大きく左右されないプロセスであること。
- (iii) 作製時にバネ定数、質量のコントロールが可能であること。
- (iv) 振動子の励振、振動検出が可能な構成が存在すること。
- (v) 支持部等のより低い固有振動数によって分解能が劣化しにくいこと。

などである。著者らは当初、鋭利な金属探針を真空中で加熱してこけし状の振動子を得る方法を試みていた^{41)~45)}。 100 nm 大の振動子が得られたが、頸部がもろいためと、バッチ加工が困難なためにこの手法を打ち切り⁴⁶⁾、現在はシリコン基盤を用いた振動子の作製方法を行っている⁴⁷⁾。図7にプロセスの説明図と作製例を示す。上記の必要項目の多くを満たす手法として、SOI (silicon on insulator) 基盤の表面のシリコンを、シリコンの KOH に対する異方性エッチング^{48), 49)} を利用して 100 nm から $1 \mu\text{m}$ 大の四面体状探針に加工し、その下の酸化シリコン層に弾性支持部を作製する、という方法を実現した。これにより、 100 nm

から $1 \mu\text{m}$ 大の振動子を作製可能となった^{50)~51)}。振動子の質量の大きさは SOI の上部シリコン層の厚さで規定され、その形状は結晶の方位により保証される。頸部の長さは酸化シリコン層の厚さで自由に選択可能である。頸部の直径に関しては、半径方向で 1 nm/s の除去速度の安定した制御に成功しており、エッチング時間を変えることにより数 10 nm 程度の頸部が安定に作製可能となった。次章で紹介するが、得られたナノ振動子の弾性支持部は実用性のある弾性を示し、また、シリコンと酸化シリコンの界面は最低 1 GPa 以上の強度が確認されている。ナノ振動子の動特性の測定を通じ、力と質量変化の分解能の評価が可能となる。

5. 走査型電子顕微鏡試料台にマウントされる走査型力顕微鏡

可視化のための素子、例えば走査型力顕微鏡の力検出素子を小型化することにより多くの利点を得られる。いままでに利点として、分解能の向上、高速現象の観察などを挙げた。それ以外にも、小型化によるバルク材料を遙かに凌ぐ強度の実現、メソスコピック効果の応用などが期待される。新たな機能の実現のため、ナノメートルオーダの構造物の3次元化が進んでいる。走査型力顕微鏡は、通常アスペクト比のあまり高くない試料の観察に用いられ、3次元の構造物の観察にはそれ単体では適さない。この問題点を受け、3次元のナノ構造物の特性評価を目的として、走査型電子顕微鏡の試料台に装着される走査型力顕微鏡を作製した⁵²⁾。走査型電子顕微鏡は3次元のナノ構造物にプローブを位置決めするための視覚情報を得るために用いた。光学的計測も想定して、走査型力顕微鏡プローブ以外に、光ファイバー等を数 mm の範囲に渡って nm 以下の分解能で位置決め可能な xyz 粗微動機構を有している。この粗微動機構は $1\sim2$ 立方センチメートルの体積を有し、比較的小型である。このような位置決め機構を複数個用いることにより、走査型電子顕微鏡内で試料の位置決めや、光学系の調整が可能となっている。使用例として、前章で紹介したナノ振動子を走査型力顕微鏡で変形させた結果を図8に示す。酸化シリコンの頸部がしなやかに弾性変形する様子が観察された。電子ビームを走査型力顕微鏡の探針とナノ振動子の接触部に数分照射することによりハイドロカーボンコンタミナントの析出による接合が可能である。探針で接合の上頸部の引っ張りや剪断破壊を行ったところ、 1 GPa 以上の強度が確認された。この値を直径 10 nm の頸部に当てはめると、 50 nN の力で破断する計算になる。応力歪み曲線の測定に限らず、3次元ナノ構造物への各種プローブの位置決め、機械、電気、光特性の評価にも本装置は有効である。

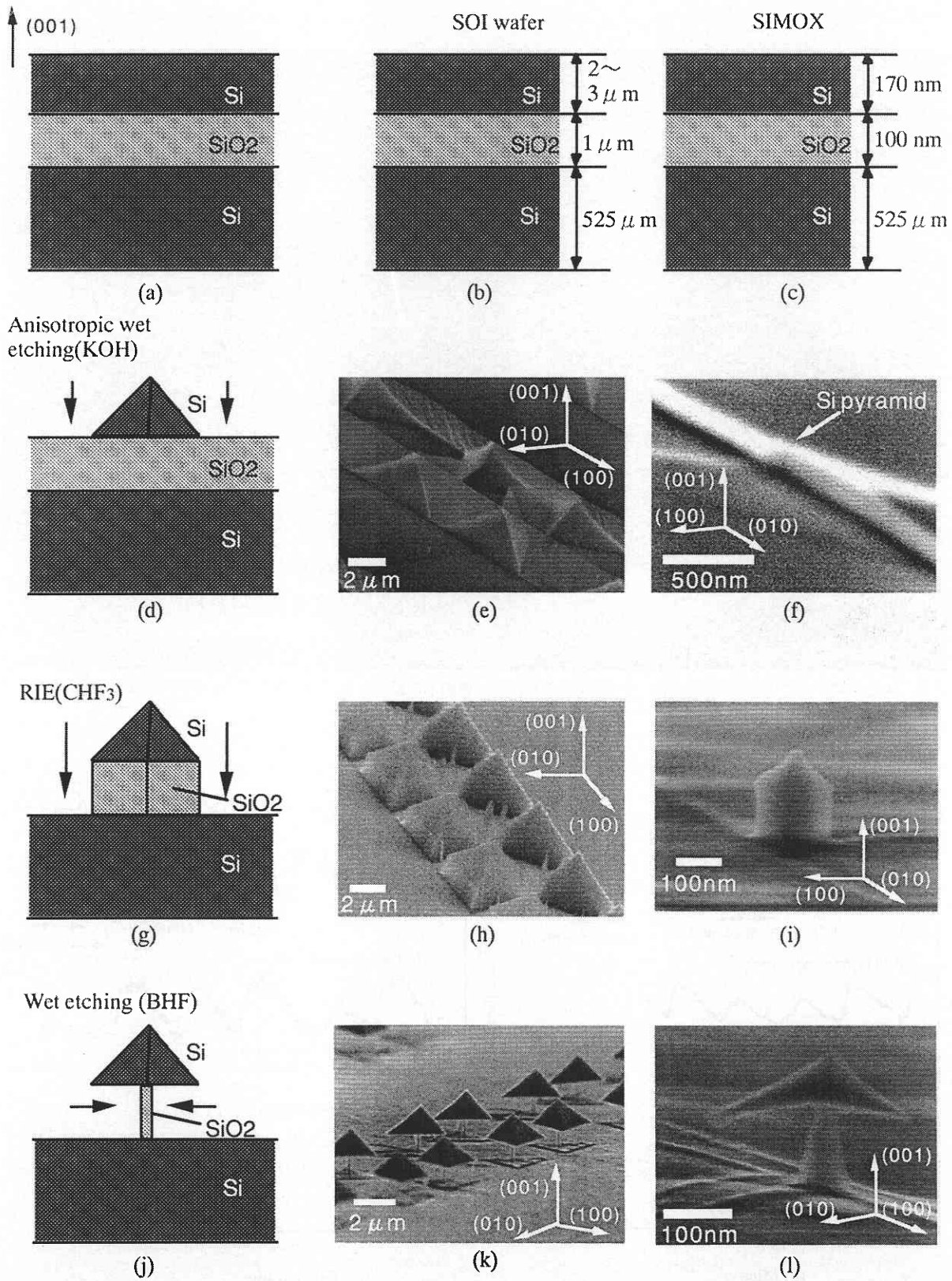


図7 SOI基盤とシリコンのKOHに対する異方性エッチングを用いた振動子の作製方法。(a), (d), (g), (j)は作製方法の模式図。(b), (e), (h), (k)は対応するミクロン厚のSOIの場合。(c), (f), (i), (l)は対応するSIMOX (separation by implanted oxygen) の場合。

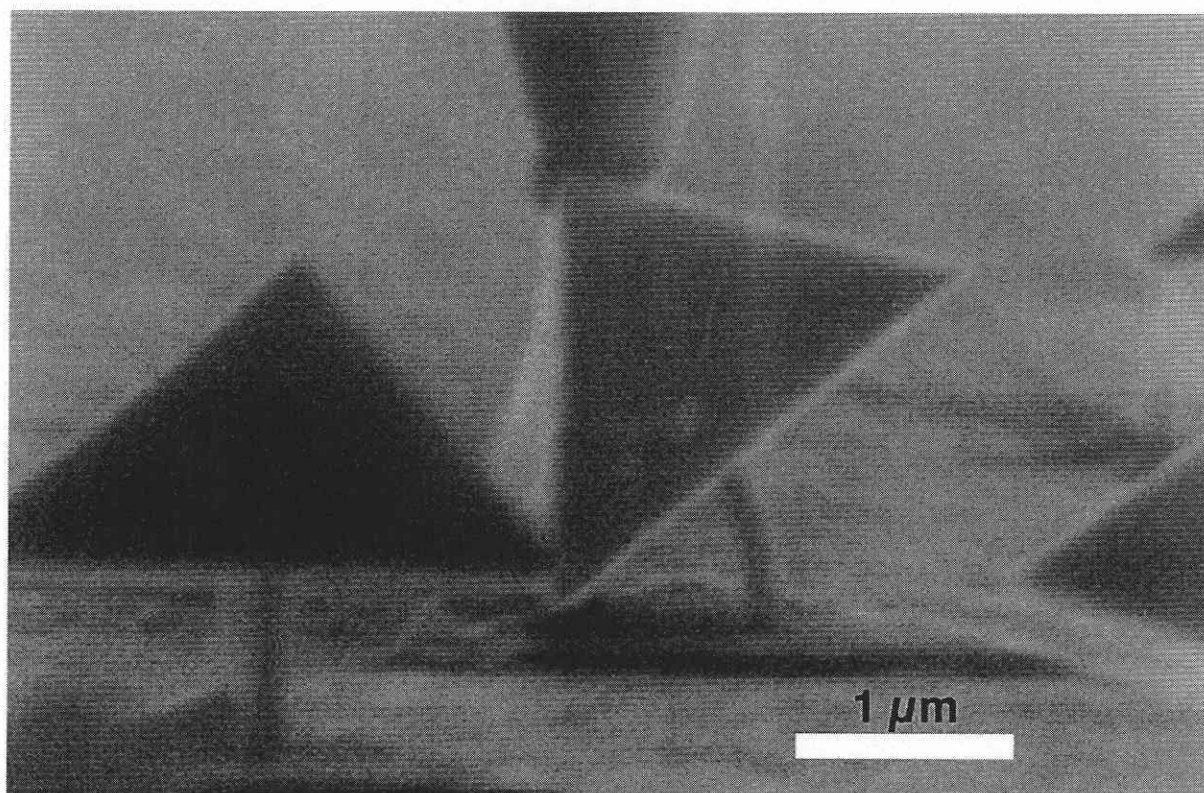


図8 走査型電子顕微鏡内で走査型力顕微鏡を動作させ、ナノ振動子の頸部を変形させたところ。四面体探針とベースはシリコン、頸部は酸化シリコンからなる。

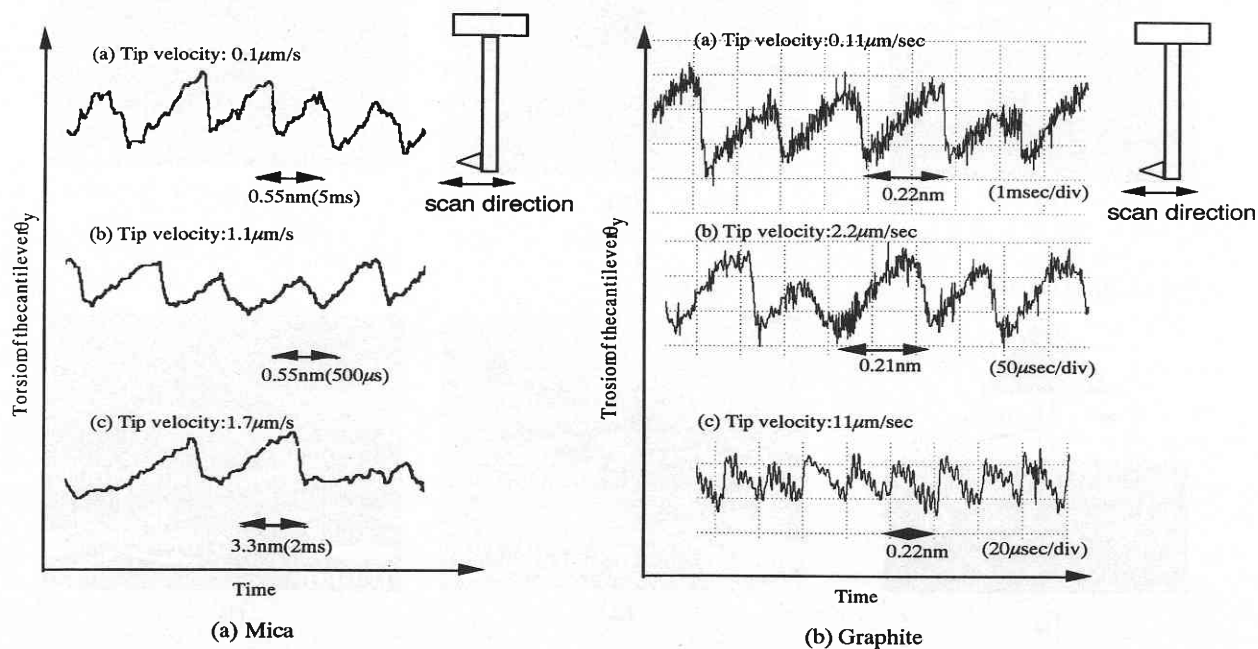
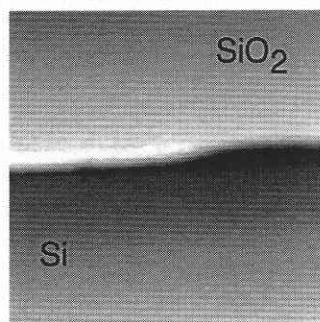
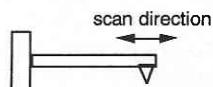


図9 走査型力顕微鏡のカンチレバーの捻れを光りてこで検出した場合の捻れ信号。(a) マイカ、(b) グラファイト。鋸波状の信号は探針が離散的な吸着点に順次吸着することにより生じている。(b) グラファイトの場合、カンチレバーの捻れ固有振動が重畳している。振幅マッピングでは、この固有振動振幅をマッピングする。

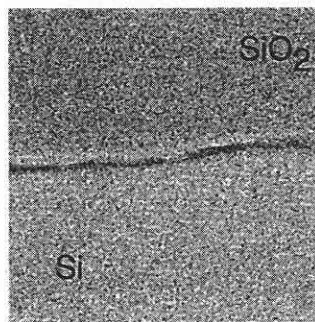
6. 接触式走査型力顕微鏡における表面状態のマッピング

接触式走査型力顕微鏡では、図1に示したような形で、カンチレバー先端の探針を試料に接触させて試料の観察を行う。基本的に、カンチレバーのたわみから形状の、ねじれから摩擦の情報が得られる。更に多くの情報を得るための観察手法としては、(i) 探針の試料表面からの離れ易さのマッピング、(ii) 表面弾性波遅延線を観察することによる、超音波の受信強度と位相のマッピング、(iii) 試料を横方向に加振し、カンチレバーのねじれの振幅と位相を

検出することによる試料の粘弾性のマッピング、(iv) カンチレバーを振動させ、コンタクト直前の状態を観察する吸着性のマッピング法、などが挙げられる。著者らは、原子レベルの摺動面の挙動の観察を行う過程で、カンチレバーのねじれ固有振動の振幅が、試料によっては数10 nNの押しつけ力でのコンタクト後も大きく減衰しないことを発見した⁵³⁾。例えば、図9に示すように、マイカとグラファイトを比べると、前者の場合コンタクトと同時にカンチレバーのねじれ固有振動はほとんど観察されなくなるが、後者の場合、押しつけ力が10 nN程度あっても正弦波状のね

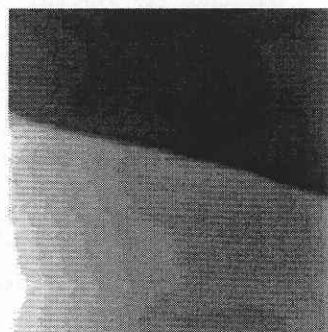
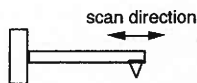


(a) $1.1 \mu\text{m} \times 1.1 \mu\text{m}$ topographic image
Step height: 60nm.

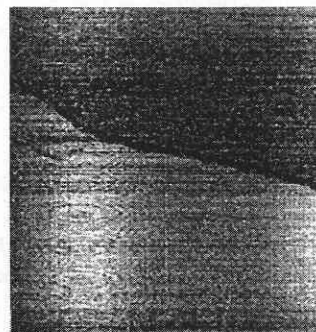


(b) $1.1 \mu\text{m} \times 1.1 \mu\text{m}$ lateral vibration
amplitude image (250kHz)

図10 シリコンと酸化シリコンの段差前後の可視化。(a) トポグラフィー像、段差60 nm。
(b) カンチレバーの捻れ固有振動振幅像。



(a) $1.1 \mu\text{m} \times 1.1 \mu\text{m}$ topographic image
Step height: 2nm



(b) $1.9 \mu\text{m} \times 1.9 \mu\text{m}$ lateral vibration
amplitude image (250kHz)

図11 グラファイトについて2 nmの段差を含む領域の可視化。(a) トポグラフィー像、
(b) カンチレバーの捻れ固有振動振幅像。

じれ振動が持続ける。この現象は試料をカンチレバーの固有振動数よりも低い周波数で加振する上記の粘弾性測定と比べて、より探針と試料の界面の状態を鋭敏に反映していると考えられる。

図 10 に酸化シリコンとシリコン、図 11 にグラファイトを試料とした場合のカンチレバーの捻れ固有振動振幅をマッピングしたものを示す。シリコンは疎水性、酸化シリコンは親水性を示す。おそらくこの親水性の違いにより、探針の試料面内の振動振幅に差が生じていると考えられる。図 11 のグラファイトの場合、2 nm の段差を挟んで振動振幅に差が生じている。現在のところ、このコントラストメカニズムは明らかにされていないが、結晶の方位の影響や、探針の試料への接触状況の変化を反映していると考えられ、この手法を新しい可視化手法として期待している。

ま と め

走査型プローブ顕微鏡、マイクロメカトロニクス、可視化技術の 3 つのキーワードと関連のあるテーマの解説を行った。今後、マイクロメカトロニクス素子のサブ μm 化により新たな性能や機能を実現し、いままで不可視であったものの可視化を行いたい。更に、その素子のマルチ化を通じて人間の享受しうる効率と速度で機能を実現したい。

謝 辞

本解説は多くの研究者との共同研究の成果をまとめたものである。ここで、諸氏に感謝の意を表したい。川合稔氏、斉藤孝史氏（摺動面の可視化）、樋口俊郎氏、星泰雄氏、鴻上弘氏（位置決め）、藤田博之氏、年吉洋氏、佐谷大輔氏、福島公威氏（ナノ振動子、SEM-AFM）、池田耕吉氏（研究支援）。

(2000 年 7 月 4 日受理)

参 考 文 献

- 1) G. Binnig and H. Rohrer, Scanning tunneling microscopy, *Helv. Phys. Acta* 55, 726 (1982).
- 2) G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, Atomic Force Microscope, *Phys. Rev. Lett.* 12, 930 (1986).
- 3) D. W. Pohl, IBM J. REs. Develop. 30, 417, (1986).
- 4) Near Field Optics, D. W. Pohl, and D. Courjon, Ed., NATO ASI Series E, 242, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993.
- 5) P. Gutter, H.J. Mamin, and D. Rugar, in Scanning Tunneling Microscopy II, 151, ed. R. Wiesendanger and H.-J. Guntherodt, (Springer, Berlin, 1992).
- 6) D. Rugar, H. J. Mamin, P. Guethner, S.E. Lambert, J. E. Stern, I. R. McFadyen, and T. Yogi, *J. Appl. Phys.*, 68, 1169 (1990).
- 7) C. Shonenberger, S. F. Alvarado, *Z. Phys. B.* 80, 373 (1990).
- 8) R. Kaneko, K. Nonaka, and K. Yasuda, Scanning Tunneling Microscopy and Atomic Force Microscopy for Microtribology, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 6-2, 291, (1988).
- 9) E. Meyer, R. Overney, D. Brodbeck, L. Howald, R. Luthi, J. Frommer and H.-J. Guntherodt, Friction and wear of Langmuir-Blodgett Films Observed by Friction Force Microscopy, *Phys. Rev. Lett.*, 69, 1777, (1992).
- 10) C. Mate, G. McClelland, R. Erlandsson, and S. Chang, atomic scale friction of a Tungsten tip on a graphite surface, *Phys. Rev. Lett.*, 59, 1942, (1987).
- 11) G. Meyer, and N. M. Amer, Simultaneous measurement of lateral and normal forces with an optical -beam-deflection atomic force microscope, *Appl. Phys. Lett.* 57, 2089, (1990).
- 12) R. C. Barrett and C.F. Quate, *Ultramicroscopy*, 42-44, 262 (1992).
- 13) S. Watanabe and K. Hane, T. Ohye, M. Ito and T. Goto, Electrostatic Force Microscope Imaging Analyzed by the Surface Charge Method, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 11, 1774 (1993).
- 14) C. Shafai, D. J. Thomson and M. Simard-Norman, *J. Vac. Sci. Technol. B* 12, 378 (1994).
- 15) M. Fujihira, H. Monobe, H. Muramatsu, and T. Akata, *Chem. Lett.* 1994, 657, *Ultramicroscopy* (1994).
- 16) 例えば、西川治編著, "走査型プローブ顕微鏡", 丸善, 1998. R. Wiesendanger, Scanning probe microscopy, Springer, 1998.
- 17) 例えば、eds. P. Descouts and H. Siegenthaler, Ten years of STM, *Ultramicroscopy* 42-44 (1992).
- 18) Eds. J. K. Horber et al. Scanning tunneling microscopy/spectroscopy and related techniques: proceedings of the Ninth international conference, *Appl. Phys. A.* (1998).
- 19) T. V. Vorburger, J. A. Dagata, G. Wilkening, and K. Iizuka, *Annals of the CIRP*, 46, 597, (1997).
- 20) H. Kawakatsu, T. Saito, H. Kougami, P. Blalatt, M. Kawai, M. Watanabe, and N. Nishioki, Detecting and controlling forces in atomic force microscopy with multidegrees of freedom, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 12, 1686, (1994).
- 21) H. Kawakatsu and T. Saito, Scanning force microscopy with two optical levers for detection of deformations of the cantilever, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 14, 872, (1996).
- 22) H. Kawakatsu, H. Bleuler, T. Saito, and H. Kougami, Dual Optical levers for Atomic Force Microscopy, *Jpn. J. Appl. Phys.* 34, 3400, (1995).
- 23) D. W. Abraham, C.C. Williams, and H.K. Wickramasinghe, *J. of Microscopy*, 152, 599, (1988).
- 24) E.P. Stoll and J. K. Gimzewski, Fundamental and practical aspects of differential scanning microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. B* 9, 643, (1991).
- 25) D. W. Pohl, R. Moller, *Rev. Sci. Instrum.* 59, 840, (1988).
- 26) H. Kawakatsu and T. Higuchi, *Mon. J. Inst. Ind. Sci.*, 40, 12 609 (1988).
- 27) H. Kawakatsu and T. Higuchi, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 8, 319, (1990).
- 28) H. Kawakatsu, Y. Hoshi, T. Higuchi, and H. Kitano, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 9, 651, (1991).
- 29) H. Kawakatsu, Y. Hoshi, H. Bleuler, H. Kougami, M. Bossardt and N. Vezzin, *Appl. Phys. A* 66, S 853, (1998).
- 30) H. Kawakatsu and H. Kougami, Automated calibration of the sample image using crystalline lattice for scale reference in scanning tunneling microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. B* 14, 11, (1996).
- 31) T. Fujii, M. Suzuki, T. Higuchi, H. Kougami, and H. Kawakatsu, *J. Vac. Sci. Technol. B* 13, 1112 (1995).

- 32) T. R. Albrecht, P. Günter, D. Horne and D. Rugar: J. Appl. Phys. 69 (1991) 668.
- 33) T. D. Stowe, K. Yasumura, T. W. Kenny, D. Botkin, K. Wago and D. Rugar: Appl Phys. Lett. 71 (1997) 288.
- 34) D. A. Walters, J. P. Cleveland, N.H. Thomson, P. K. Hansma, M. A. Wendman, G. Gurley and V. Elings: Rev. Sci. Instrum. 67 (1996) 3583.
- 35) K Wago, O. Züger, J. Wegener, R. Kendrick, C. S. Yannoni and D. Rugar: Rev. Sci. Instrum. 68 (1997) 1823.
- 36) B. W. Chui, T. D. Stowe, T. W. Kenny, H. J. Mamin, B. D. Terris and D. Rugar: Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 2767.
- 37) G. T. Palocz, B. L. Smith, P.K. Hansma and D. A. Walters, M. A. Wendman, Appl. Phys. Lett: 73 (1998) 1658.
- 38) J. Brugger, G. Beljakovic, M. Despont, N. F. de Rooij, P. Vettiger, Microelectronic Engineering, 35 (1997) 401.
- 39) A. N. Cleland and M. L. Roukes, Appl. Phys. Lett. 69 (1996), 2653.
- 40) Y. Hoshi, T. Kawagishi, H. Kawakatsu, Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 3804.
- 41) F. A. Nichols and W.W. Mullins: J. Appl. Phys. 36 (1965) 1826.
- 42) M. Drechsler, A. Piquet, R. Uzan and Vu Thien Binh: Surf. Sci. 14 (1969) 457.
- 43) Vu Thien Binh, M. Chaudier, J. C. Couturier, R. Uzan and M. Drechsler: Surf. Sci. 57 (1976) 184.
- 44) M. Drechsler, S. Ramadani, A. Claverie and A. Maas: J. Phys. Colloq. (1987) C 6-209.
- 45) Vu. Thien Binh, N. Garcia and A. L. Levanuyk: Surf. Sci. Lett. 301 (1994) L 224.
- 46) H. Kawakatsu, D. Saya, M. de Labachellerie, H.-J. Hug and H.-J. Güntherodt: Jpn J. Appl. Phys. 38 (1999) No.6 B.
- 47) H. Kawakatsu, H. Toshiyoshi, D. Saya, H. Fujita, Jpn J. Appl. Phys. 38 (1999) 3962.
- 48) G. Hashiguchi and H. Mimura, Jpn. J. Appl. Phys., 33 (1994) L 1649.
- 49) G. Hashiguchi and H. Mimura, Jpn. J. Appl. Phys., 34 (1995) 1493.
- 50) H. Kawakatsu, H. Toshiyoshi, D. Saya, H. Fujita, J. Vac. Sci. Technol B 18, 607, 2000.
- 51) H. Kawakatsu, H. Toshiyoshi, D. Saya, K. Fukushima, H. Fujita, Appl. Surf. Sci. 157, 320, 2000.
- 52) K. Fukushima, D. Saya, H. Kawakatsu, Jpn. J. Appl. Phys 39 (2000) 3747.