STM による固体表面のナノ加工

小宮山 政 晴

東北大学工学部分子化学工学科 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

(1989年9月18日 受理)

Nano-Fabrication of Solid Surfaces Using STM

Masaharu KOMIYAMA

Department of Molecular Chemistry and Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University
Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai 980

(Received September 18, 1989)

走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いたナノメートルレベルでの固体表面の超微細加工について紹介した。STM による超微細表面加工の手法を、1) 機械的加工、2) 電気的加工、3) 熱的加工、4) 化学的加工、5) 液体中での加工の5つに分類し、各々の原理を解説した。また各手法による超微細表面加工の例を示し、作成された構造の大きさや密度を比較した。

1. はじめに

Binnig と Rohrer とにより開発され 1982 年に発表された走査型トンネル顕微鏡 (STM)¹⁾ は、実空間で原子像を解像するという空間分解能の高さと、気体・液体中でも測定が可能であるという特徴から、表面科学の分野で活発な研究が展開されている。STM に関する国際会議も 1989 年に本邦で開催されたもの (STM '89) で 4 回をかぞえ、ここでは 5 日間で 200 件をこえる論文が発表された。研究用機器としての需要も高く、何種類もの STM 装置が市販され始めている。STM は導体および半導体の表面観察の手法としてはほぼ確立の時期に入ったといえることができる。

STM の研究の進展にともない、ここ数年の間に STM が固体表面の加工に利用できることが明らかになってきた。STM を用いる表面加工の特徴は、ナノメートルから分子・原子レベルまでの超微細加工 (マイクロファブリケーション) が可能な点にある。1990 年の第 5 回 STM 国際会議 (STM '90) ではナノメータースケールの科学と技術に関する国際会議 (NANO I) が同時に開催されることになっており、STM による超微細表面加工はいわゆるナノテクノロジーのひとつとして走査トンネル工学 (scanning tunnelling engineering)²⁾ の主要な分野を構成するものと予想される。

本稿では STM を利用したナノメートルレベルでの固体表面の超微細加工の現状を概観する。なお STM そのものの原理や応用の詳細については他の総説等³⁾ を参照されたい。また STM を利用した超微細加工に関する総説もすでにいくつか書かれている⁴⁾。

2. STM による表面加工の特徴

STM では、探針の先端と試料の表面とを 1 nm 程度に近づけ、両者の間にバイアス電圧を印加したときに流れるトンネル電流から表面の凹凸情報を得る。STM が原子分解能を有しているのは、この探針の位置制御が面内および法線方向共に原子の大きさよりも小さなレベル (サブオングストロームのオーダー) でなされているからである。STM による超微細表面加工は一にこの精密な位置決め技術に依存している。

表面を加工する際には、被加工表面になんらかの形のエネルギーを加えるわけであるが、STM ではこれらの加工エネルギーが精密に位置制御された探針を介して与えられることになる。この加えられるエネルギーの形態およびそれによって表面に生起する過程を基にして、STM によるマイクロファブリケーションの方法をいくつかに分類することができよう。表 1 は現時点で考えられる分類の一つである。これらの加工方法はその機構が必ずしも明確ではなく、また液体中での加工のようにい

表 1 STM による表面超微細加工の便宜的分類。

分 類	印加エネルギー	内 容 (文献)
機械的加工	機 械	探針を工具として使用 5)~11)
電氣的加工		電界による物質移動 7), 12), 13)
熱的 加工	電 気	Joule 熱による融解 14)~17)
化学的加工		電子による化学反応 18)~27)
液体中の加工	電気等	液体中分極下での化学反応 28)~30)

くつかの過程が複合して起っていると考えられる場合もあるので、この分類はあくまで便宜的なものである。

以下、表 1 の便宜的分類にしたがって各々の方法による加工例を紹介する。

3. STM による表面加工の例

3.1 機械的加工

1) ドットの作成

機械的加工で最も簡単なものは、探針と表面とを直接接触させるというものであろう。Van de Walle ら⁵⁾は、探針先端の形状を見る目的で、真空中 Ag(001) 表面に W 探針を数十 nm ほど押し込み、その跡を STM により観察した。Ag 表面にはいくつかの面で囲まれた深さ 10 nm、差渡し 30~60 nm の角錐状のくぼみができており、これは探針先端の形状を表わすものとしている。一方 Gimzewski ら⁶⁾は超高真空中で清浄度の異なる Ir 探針を蒸着 Ag 薄膜 (基板 Si(111), 厚さ 100 nm) に点接触させた。フィールドエミッションにより清浄化した直後の針を用いると、Ag 表面に高さ 2 nm、直径 3~10 nm の突起ができるが、超高真空中に数時間放置した針ではくぼみが生成する。I-V 特性の変化とあわせて各

各の加工の機構について検討している。なおこの場合、針を表面から数オングストローム押し込んだだけのくぼみは数分以内に消滅したという。

Au 表面にドットを作成した例もいくつかある。Abraham ら⁷⁾は超高真空中で Au(210) 表面に W 探針を接触させ、差渡し 15 nm、深さ 3 nm 程度のくぼみを作成した。接触直後には周囲 70 nm にわたってより微小な変形が引き起こされたが、後者の変形は数分後には緩和してしまい、10 数分後には前者の変形のみが約 1 nm の深さで安定に残ったという。また Jaklevic と Elie⁸⁾は超高真空中で W 探針を Au(111) 面に接触させ、その跡が表面拡散によりゆっくり埋められてゆく様子を 2 時間にわたって観察している。この場合には中央の小さな変形から徐々に緩和消失している。

この他、超高真空中で W 探針による Si(110) と (001) 表面の加工例も報告されている⁹⁾。2~10 nm サイズの安定なくぼみを作成できたという。

2) マイクロマシニング

以上は探針を Z 方向に動かしての加工であるが、McCord と Pease¹⁰⁾は W 探針を表面と接触させた状態で X, Y 方向の移動を行い、Si 表面に蒸着したフッ化カルシウムまたはフッ化アルミニウムの薄膜 (厚さ 20 nm) の表面にみぞを切ること成功した。図 1(a) はフッ化カルシウム薄膜の加工例である。1.5 μm おきに 0.36 μm 幅のみぞが切られている。またフッ化アルミニウム薄膜の加工からは、図 1(b) に示すような通常の金属を切削したときに得られるものに類似したコイル状の削りくずが得られている。

また Packard ら¹¹⁾は大気中 Pt 探針を用いて、Au 薄膜のサンダー仕上げ、たがね打ち、Hg_{1-x}Cd_xTe 結晶表面でのカキ出しなどのナノ機械加工 (nano-machining) を行った。サンダー仕上げでは Au 表面にあった直径

図 1 (a) STM による Si 表面に蒸着したフッ化カルシウム薄膜 (厚さ 20 nm) のマイクロマシニング。1.5 μm おきに 0.36 μm 幅のみぞが切られている。(b) フッ化アルミニウム薄膜 (厚さ 20 nm) を同様に加工した際に得られたコイル状の削りくず¹⁰⁾。

5 nm, 高さ 0.3 nm の突起を平滑にしている。またたがね打ちにより, 40 nm おきに数本のみぞを刻んでいる。

3.2 電氣的加工——電界による物質移動

STM 装置の構成から, 容易に表面に印加できるもうひとつのエネルギーは電氣的エネルギーである。これは通常電圧の形で与えられるが, STM 測定との関係上短時間のパルスとして加えられることが多い。このような電氣的パルス印加の結果, 探針-試料表面の間にはさまざまな物理的・化学的過程が生起する。ここではさまざまな加工例を, 電氣的パルスにより生じる過程の特性を基にした表1の便宜的方法にしたがって, 電氣的, 熱的, および化学的過程に分類した。

まずバイアスをかけた探針と表面との間に生ずる電界によると考えられる加工例であるが, Abraham ら⁷⁾は超高真空中W探針を用い, トンネル電圧を一定に保ったままでトンネル電流を 10 nA から 1 μ A に上げることで, Au (210) 表面に差渡し 20 nm, 高さ 2 nm の突起を形成している。バイアスを逆にした場合にも同様の突起が作成できたという。この場合探針はこの電流増加に対応して試料表面に近づいていると考えられ, このとき探針表面に付着していた Au が試料表面に移動したものである。

また Becker ら¹²⁾は超高真空中W探針から Ge (111) 面に 4 V の電圧パルスを加え, 図2に示すようにはば1原子の大きさに相当する直径 0.8 nm, 高さ 0.1 nm の突起の作成に成功した。この突起も探針に付着していた Ge 原子が表面に移行してできたものと考えている。なお突起作成の成功率にはばらつきがあること, また Si (111) 表面ではこのような加工は全く成功しなかったとしている。

これらの例は, 探針を一種のイオンソースとして使用

図2 (a)再構成 Ge (111)面の STM 像。画面は 5.0×6.5 nm。白棒は c-(2×8)のユニットセル。(b) (a)の領域で 4 V の電圧パルスを加えた後。矢印は新しく加えられた原子¹²⁾。

したものと考えることができよう。Bell ら¹³⁾は W 探針をあらかじめ Ga で被覆し, これを液体金属イオンソースとして用いて, 高真空中 GaAs および Si 表面の加工を試みている。

3.3 熱的加工——Joule 熱による融解

Stauffer ら¹⁴⁾は, Rh₂₅Zr₇₅, Fe₈₆B₁₄, Co₃₅Tb₆₅, Ir₂₈B₉Mo₆₃ などのアモルファス合金表面をイオンミリングにより平滑にした後, 超高真空中探針-試料間に数秒間数 V で数百 nA の電流を流して, 直径 10 nm 程度の半球状の突起や 20 nm ほどの太さの線を作成した^{14a)}。さらにこれを利用して 800×800 nm² の領域にいくつかの文字を書くことに成功している^{14b)}。この加工法は再現性が高く, 探針の種類によらないこと, 半球状突起の大きさは印加電圧に依存すること, また電流, 電圧それぞれに試料の種類に依存したしきい値が存在すると報告している。彼らはこれらの試料上での電圧印加による突起形成を, 試料表面の部分融解と探針-試料間の電場による Taylor コーンの生成から説明している。このような部分融解はアモルファス材料の電子の平均自由行程が短くかつ熱伝導度も低いためであるとし, 2 V, 1 nA での温度上昇を, 結晶性材料での 10⁻³K に対してアモルファス材料では 10³K 程度と推算している¹⁴⁾。

一方酸素アセチレン炎中で Au 線を融解して得た結晶性の Au 試料でも, 大気中および真空中で 1.4 V 以上のバイアスをかけると試料表面に突起が形成されると報告されている¹⁵⁾。この突起の形成は探針が負にバイアスされた時のみに観察され, また試料表面の粗さに依存したという。さらに Pt 表面では 2.5 V までのバイアスの範囲内で表面の変形は起こらなかったとしている。この場合も部分融解と Taylor コーンの生成から説明されている。

Emch ら¹⁶⁾はマイカ表面にエピタキシャル成長させた Au 薄膜 (厚さ 100 nm 以上) に大気中 W 探針から電圧パルスを加えることにより 5 nm 前後の大きさのくぼみまたは突起ができると報告した。この場合にもパルス電圧とパルス時間とにしきい値 (約 3 V, 10 ns) があること, またパルスの極性には依存しないと報告されている。また超高真空中での Au 表面での機械加工の場合と同様, 加工跡は半時間ぐらいのオーダーで徐々に埋められていくと報告している。

Li ら¹⁷⁾はこのような電氣的パルスによる Au 表面の加工に関して加工条件の検討を行っている。彼らは Au 線を融解して得た結晶性の Au 試料に大気中で電圧パルスを加え, くぼみまたは突起を作成した。図3に示すように, くぼみができる場合と突起ができる場合とでは電圧パルスに対する試料電流の応答が大きく異なり, 大電

図 3 An 結晶表面にステップ電圧（図上段）を加えた時の探針電流（中段）およびフィードバック電圧（下段）の応答。(a) 試料表面にくぼみができる場合，(b) 突起ができる場合。挿入図はパルス印加後の表面の STM 像¹⁷⁾。

流 (>100 nA) が長時間 (~ 2 ms) 流れるような場合には突起ができるという。電流応答の違いはパルスを加えた時点での試料-探針間の距離によるものとしている。なおこの場合にも電圧には約 2.7 V のしきい値があるが，加工跡は非常に安定であったという。

このように結晶性の Au 表面の電気パルスによる加工には研究者による違いが大きい。結晶性導体の温度が数 V の電気的パルスによりどの程度上がるかという点からも，加工機構の検討が待たれる。

3.4 化学的加工

試料表面または探針-試料間に吸着分子や気相分子が存在すると，電子との相互作用によりこれらの分子の分解，分子間の反応，分子と表面との反応などが生起する。このような化学的過程を利用した加工は，分子種の選択や組み合わせの幅が広いいため種々の表面加工に応用できるものと考えられ，また表面加工のみならず分子そのものの加工にも応用され始めている。

1) レジスト露光

Ringger ら¹⁸⁾は 10^{-8} Torr の真空中 W 探針により通常の STM 条件で走査したアモルファス $\text{Pd}_{81}\text{Si}_{19}$ 合金表面の SEM 観察から， 2 nm 程度の太さで平均 16 nm の間隔でならんでいるラインを見いだした。XPS 観察によればこの表面にはカルボニル酸素を含む 2 分子層の炭火水素が汚染物として存在しており，彼らはこの炭素水素が STM 測定時に縮重合したいわゆる汚染レジス

トであると推測した。

McCord と Pease¹⁹⁾は STM を 10 V 程度のフィールドエミッション領域で走査し，Si 表面の蒸着 Au 薄膜（厚さ 100 nm）に汚染レジストのラインを引き，さらにこの表面をスパッタエッチングすることによって 0.1 μm 幅の Au ラインを得ている。また Si 表面の蒸着 Al 薄膜（厚さ 100 nm）をドコセン酸 LB 膜 3 層で覆い，STM で露光したのち湿式エッチングして同じくラインパターンを得ている^{19a)}。さらに Si 上にスピコートしたポリメタクリル酸メチル (PMMA) を STM で露光し，これに Au-Pd 薄膜を蒸着してリフトオフする方法により種々のパターンを作成している。図 4 はこの方法で作成した長さ 2 μm ，幅 120 nm の Au-Pd 薄膜抵抗であり，室温で 2.5 k Ω の抵抗値を示したという^{19b)}。

またジアセチレン系のレジスト材の STM によるリソグラフィーも試みられている²⁰⁾。

2) 分子の分解によるドットの作成

Ehrichs と de Lozanne ら²¹⁾はジメチルカドミウム (DMCd)，トリメチルアルミニウム，六フッ化タングステンなどの有機金属ガスを $0.1 \sim 1$ mTorr 程度の圧力で STM チャンバーに送り込んで数 V の電圧パルスを加えることにより，Cu, Si などの表面にドットやラインを書くことに成功した。DMCd の場合このような構造を作成するのに必要な電圧は約 3 V であり，これは DMCd の結合解離エネルギー (72.4 kcal/mol $= 3.14$ eV)

図4 Si上にスピコートしたポリメタクリル酸メチルをSTMで露光し、これに金属薄膜を蒸着してリフトオフする方法により作成した長さ2 μm 、幅120 nmのAu-Pd薄膜抵抗。室温で2.5 k Ω の抵抗値を示す^{19b)}。

にほぼ一致するとしている。Si(111)面上にDMCdを用いて引いたラインのオージェ分析によれば、ライン部分は74%の炭素と4%のCdからできており、DMCdの分解と同時に汚染炭化水素の分解も起っているものと考えられる。なおこの方法は電圧パルスの極性には依存しなかったという。

一方McCordら²²⁾はタングステンヘキサカルボニルおよびAuのアセチルアセトナート錯体を5~20 mTorrの圧力でSTMチャンバーに導入し、数10 V、数10 nAの電流を流すことによりSiウェーハー上に10 nm幅のラインおよび30 nmサイズのドットを作成した。タングステンヘキサカルボニルを分解して得たラインのオージェ分析によれば、作成ラインは48% W、40% 炭素および12%の酸素からできているという。これら金属の析出を印加電圧と電流の広い範囲で検討したところ、図5に示すように金属析出領域、汚染炭素析出領域、析出不安定な領域などが見いだされた。またタングステンヘキサカルボニルの分解析出によるドット作成では、高アスペクト比(直径25 nm、高さ280 nm)の“垂直ドット”も作成している。

またKanekoとHamada²³⁾はSi表面にスピコートした非導電性の有機染料薄膜(厚さ5 nm)に15 V以下の電圧パルスを印加して絶縁破壊を起させ、直径100 nm、高さ3~9 nmのドットを作成している。

3) 基板表面との化学反応

雰囲気ガスと試料の組み合わせによっては、電気的パルスの印加により雰囲気または吸着分子と試料表面とが

図5 STMによるタングステンヘキサカルボニルおよび金アセチルアセトナート錯体の分解析出特性の電圧電流依存性。ガス圧は5~20 mTorr。金属析出領域、汚染炭素析出領域、析出不安定な領域などがある²²⁾。

反応する場合がある。これはいわゆる反応性エッチングに相当するものであり、後述する液体中での加工にもこの範中に入るものがあるが、ここでは気相雰囲気と試料表面との反応による加工例を見てみる。

Ehrichsとde Lozanneら^{21d)}は、STMチャンバーに六フッ化タングステンを導入することによりSi表面に最小20 nmのくぼみを作成したという。この系では場合によっては六フッ化タングステンの分解による突起ができることもあり、いずれが優勢かは試料表面の温度によるとしている。

またAlbrechtら²⁴⁾はグラファイト表面に3~8 V、10~100 μs の電圧パルスをかけ、2 nm程度のくぼみを作成した。この方法では雰囲気中に水蒸気存在が必要であり、くぼみ生成の機構として水の関与した化学反応を考えている。制御された雰囲気下でのくぼみ生成の成功率は99.6%であり、コンピューター制御によって一文30 nmのサイズでいくつかの文字列をグラファイト上に書くことに成功している。

4) 分子の加工

電圧パルスを加えることにより、グラファイトやAuなどの表面に有機物分子を吸着、切断したという報告がいくつかある。例えばFosterら²⁵⁾はグラファイト表面にフタル酸ジメチルまたはフタル酸ジ-2-エチルヘキシルの液滴をおき、その中でW探針によるSTM測定を行った。そのままの状態ではグラファイトの原子像が見えているだけであるが、走査途中で3.7 Vの電圧パルスをかけるとその部分に各々の分子に相当する大きさの突起が生成し、もう一度パルスをかけると消失したという。

彼らはこれを電圧パルスによって励起された液相分子の吸脱着であるとしている。この現象には電圧のしきい値(〜3.5 V)があり、また極性にはよらなかったという。さらに吸着分子にパルスをかけることより小さな構造が残ることがあり、これは電圧パルスによる吸着分子の切断(分解)であるとしている。

これに対して Bernhardt ら²⁶⁾は、W および PtIr の探針を用い、グラファイト表面で類似の実験を行った。雰囲気としてはフタル酸ジメチルおよびデカンの液滴、および何も加えない大気中の3種類を試みている。いずれの雰囲気中でもほぼ同じサイズ(数 nm)の突起が生成し、またこれは針の種類にも依存しなかったという。電圧のしきい値もいずれの場合も3〜5 Vであった。生成した突起のサイズと形状およびしきい値の類似性から、これら突起生成の機構は雰囲気によらず同じである可能性があるとされている。

Dovek ら²⁷⁾は数種類の基板上に数種類の高分子 LB 膜をつけ、その分子鎖の切断を試みている。この場合には電圧のしきい値は高分子の種類によらずほぼ4 Vであり、これは結合解離エネルギーに対応しているのではなくむしろギャップ中に自由電子をつくるのに必要な障壁高さに相当するのではないかとしている。

3.5 液体中での加工——液体中分極下での化学反応

液体中の STM 加工では、STM 雰囲気として存在する液体がもうひとつの加工因子として働く可能性がある。これは、液体中にさまざまな物質が中性種またはイオン種として溶け込むことができ、これが探針-試料間での加工に際して反応種を供給したり除去したりする媒体となるからである。

Bard ら²⁸⁾はこのような液体の特性を生かした加工例をいくつか示している。ひとつは光照射下で分極した半導体表面が水中に溶解する現象を利用したもので、タングステン-ハロゲンランプ光の照射下、NaOH-EDTA 水溶液中で n-GaAs 表面を走査し、サブミクロンのラインパターンを描いている^{28a)}。また液体ではないがイオン導電性をもつ薄膜(ナフィオン)中に金属イオンを保持しておき、探針の走査により薄膜表面に金属を析出させて同じくサブミクロンのラインパターンを得ている^{28b)}。

また非極性の溶媒中での電氣的パルスによる表面加工がいくつか報告されている。Schneir ら²⁹⁾はフッ化炭素系のグリース中で Au 表面に電圧パルスを加え、数 nm の大きさのくぼみを得ている。またイオウを吸着させて不動態化した Re (0001) 表面の加工がシリコン系のオイル中で行われている³⁰⁾。これらの例での液体の役割は必ずしも明確ではないが、液体を物質移動の媒体と考えた

機構が提安されている³⁰⁾。

4. おわりに

STM による走査トンネル工学は、より微小なデバイス作成、より高密度での情報の記録と読出し³¹⁾、さらには分子操作による分子工学へとその領域を広げつつある。本稿で紹介したナノ加工の手法は、現在のところ多分に材料の種類に依存する面があり、またそれに対応して加工精度も異なっている。したがって最適な加工の手法は、加工の目的とそこで使用される材料とにより異なってくる。ただこれらの手法に共通している問題として、加工が sequential であり、大規模な加工やその読み出しには相当な時間がかかるという点があり、これら手法の実用化にはこの問題の解決が不可欠であろう。STM ユニット自身の超小型化、集積化³²⁾はこの問題解決の一つの方向を示しているものと考えられる。

文 献

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: Phys. Rev. Lett. **49**, 57 (1982).
- 2) C. Schneiker, S. Hameroff, M. Voelker, J. He, E. Dereniak and R. McCuskey: J. Microsc. **152**, 585 (1988).
- 3) 例えば (a) G. Binnig and H. Rohrer: IBM J. Res. Develop. **30**, 355 (1986). (b) 梶村皓二, 坂東 寛, 徳本洋志, 水谷 亘, 岡野 真, 小野雅敏, 岡山重夫, 村上 寛, 小野祐一: 表面科学 **8**, 2 (1987). (c) P. K. Hansma and J. Tersoff: J. Appl. Phys. **61**, R1 (1987). (d) Y. Kuk and P. J. Silverman: Rev. Sci. Instrum. **60**, 165 (1989).
- 4) (a) J. B. Pethica: Nature **325**, 388 (1987); **331**, 301 (1988). (b) 酒巻健司, 藤嶋 昭: 表面 **26**, 572 (1988). (c) 森田清三: 日本機械学会誌 (印刷中).
- 5) (a) G. F. A. Van de Walle, H. Van Kempen and P. Wyder: Surf. Sci. Lett. **167**, L219 (1986). (b) H. Van Kempen and G. F. A. Van de Walle: IBM J. Res. Develop. **30**, 355 (1986).
- 6) (a) J. K. Gimzewski, R. Moller, D. W. Pohl and R. R. Schlittler: Surf. Sci. **189/190**, 15 (1987). (b) J. K. Gimzewski and R. Moller: Phys. Rev. B **36**, 1284 (1987).
- 7) D. W. Abraham, H. J. Mamin, E. Ganz and J. Clarke: IBM J. Res. Develop. **30**, 492 (1986).
- 8) R. C. Jaklevic and L. Elie: Phys. Rev. Lett. **60**, 120 (1988).
- 9) (a) D. Dijkkamp, E. J. van Loenen, A. J. Hoeven and J. Dieleman: Abstract of STM '89, 90 (1989). (b) E. J. van Loenen, D. Dijkkamp, A. J. Hoeven, J. M. Lenssinck and J. Dieleman: (to appear).
- 10) M. A. McCord and R. F. W. Pease: Appl. Phys. Lett. **50**, 569 (1987).

- 11) W. Packard, Y. Liang, N. Dai, J. D. Dow, R. Nicolaides, R. C. Jaklevic and W. J. Kaiser: *J. Microsc.* **152**, 715 (1988).
- 12) R. S. Becker, J. A. Golovchenko and B. S. Swartzentruber: *Nature* **325**, 419 (1987).
- 13) A. E. Bell, K. Rao and L. W. Swanson: *J. Vac. Sci. Technol. B* **6**, 306 (1988).
- 14) (a) U. Staufer, R. Wiesendanger, L. Eng, L. Rosenthaler, H. R. Hidber, H.-J. Guntherodt and N. Garcia: *Appl. Phys. Lett.* **51**, 244 (1987); *J. Vac. Sci. Technol. A* **6**, 537 (1988). (b) U. Staufer, L. Scandella and R. Wiesendanger: *Z. Phys. B* (in press).
- 15) L. Nagahara, S. M. Lindsey, T. Thundat and U. Knipping: *J. Microsc.* **152**, 145 (1988).
- 16) R. Emch, J. Nogami, M. M. Doveck, C. A. Lang and C. F. Quate: *J. Microsc.* **152**, 129 (1988); *J. Appl. Phys.* **65**, 79 (1989).
- 17) Y. Z. Li, L. Vazquez, R. Piner, R. P. Andres and R. Reifenberger: *Appl. Phys. Lett.* **54**, 1424 (1989).
- 18) (a) M. Ringger, H. R. Hidber, R. Schlogel, P. Oelhafen and H.-J. Guntherodt: *Appl. Phys. Lett.* **46**, 823 (1985). (b) M. Ringger, B. W. Corb, H.-R. Hidber, R. Schlogel, R. Wiesendanger, A. Stemmer, L. Rosenthaler, A. J. Brunner, P. C. Oelhafen and H.-J. Guntherodt: *IBM J. Res. Develop.* **30**, 500 (1986).
- 19) (a) M. A. McCord and R. F. W. Pease: *J. Vac. Sci. Technol. B* **4**, 86 (1986); *Surf. Sci.* **181**, 278 (1987). (b) M. A. McCord and R. F. W. Pease: *J. Vac. Sci. Technol. B* **6**, 293 (1988).
- 20) C. R. K. Marrian and R. J. Colton: Abstract of STM '89, 92 (1989).
- 21) (a) R. M. Silver, E. E. Ehrichs and A. L. de Lozanne: *Appl. Phys. Lett.* **51**, 247 (1987). (b) E. E. Ehrichs, R. M. Silver and A. L. de Lozanne: *J. Vac. Sci. Technol. A* **6**, 540 (1988). (c) E. E. Ehrichs, S. Yoon and A. L. de Lozanne: *Appl. Phys. Lett.* **53**, 2287 (1988). (d) E. E. Ehrichs and A. L. de Lozanne: Abstract of STM '89, 209 (1989).
- 22) M. A. McCord, D. P. Kern and T. H. P. Chang: *J. Vac. Sci. Technol. B* **6**, 1877 (1988).
- 23) R. Kaneko and E. Hamada: Abstract of STM '89, 91 (1989).
- 24) T. R. Albrecht, M. M. Dovek, M. D. Kirk, C. A. Lang, C. F. Quate and D. P. E. Smith: *Appl. Phys. Lett.* (in press).
- 25) J. S. Foster, J. E. Frommer and P. C. Arnett: *Nature* **331**, 324 (1988).
- 26) R. H. Bernhardt, G. C. McGonigal, R. Schneider and D. J. Thomson: Abstract of STM '89 (1989); *J. Vac. Sci. Technol. A* (in press).
- 27) M. M. Dovek, T. R. Albrecht, S. W. J. Kuan, C. A. Lang, R. Emch, P. Grutter, C. W. Frank, R. F. Pease and C. F. Quate: *J. Microsc.* **152**, 229 (1988).
- 28) (a) C. W. Lin, F.-R. F. Fan and A. J. Bard: *J. Electrochem. Soc.* **134**, 1038 (1987). (b) D. H. Cranston, C. W. Lin and A. J. Bard: *J. Electrochem. Soc.* **135**, 785 (1987).
- 29) (a) J. Schneir and P. K. Hanasma: *Langmuir* **3**, 1025 (1987). (b) J. Schneir, R. Sonnenfeld, O. Marti and P. K. Hansma: *J. Appl. Phys.* **63**, 717 (1988).
- 30) Marchon, M. Salmeron and W. Siekhaus: *Surf. Coat. Technol.* **36**, 319 (1988).
- 31) D. J. Thomson: *J. Microsc.* **152**, 627 (1988).
- 32) (a) T. R. Albrecht, S. Akamine, M. J. Zdeblick and C. F. Quate: Abstract of STM '89 (1989). (b) S. Akamine, T. R. Albrecht, M. J. Zdeblick and C. F. Quate: *IEEE Electron Device Lett.* (in press.)