

論文内容の要旨

論文題目 半導体マイクロマシンツールを用いた局所高電界場観測に関する研究

氏名 三田 信

走査型トンネル顕微鏡 (STM) は発明以来、科学的発見に貢献してきた。また、原子間力顕微鏡などに代表される走査型プローブ顕微鏡の発明のきっかけとなった。理学的立場から見た場合、STM は原子オーダーの局所場を観察するツールとしての役割は大きい。また、近年トンネルギャップ中で起こっている現象そのものにも注目が集まっている。このような局所高電場観測を行う場合では STM を超高真空の透過型電子顕微鏡内に入れるため、その限られた空間で動く STM が必要となる。そのため、試料チャンバーに入れるサンプルの大きさは、数 mm と極めて小さくしなければならない。そこで、半導体マイクロマシン技術により高性能・高機能の 1 チップマイクロマシン STM を実現する必要がある。わずか 2.5mm 角程度の大きさのデバイスで、トンネルギャップを 0.1nm の精度で動かし、原子オーダーの現象や電界を制御する。この方法により、STM の tip の先で何が起こっているか観測でき、STM による原子や分子の操作も実時間で精度良く観測できる。

しかし、顕微鏡内は超高真空であるため、空気のダンピング効果による STM 機構の機械的制御が不足し、その動作が不安定になりやすい等の問題点がある。この不安定性の原因として構造の剛性が数 N/m と低く、原子間引力による影響が大きく出てしまったためであると従来の研究で分かっている。

図 1 にマイクロ STM の構造を示す。接地電極と駆動電極間に電圧を加え、くし歯型アークチュエータを駆動することにより tip と試料間隔を制御する。この制御はトンネル電流が一定 (tip-試料間距離が一定) になるように駆動電圧をコントロールすることによって行う。

図 2 に作製したマイクロ STM の SEM(走査型電子顕微鏡) 写真を示す。サスペンション

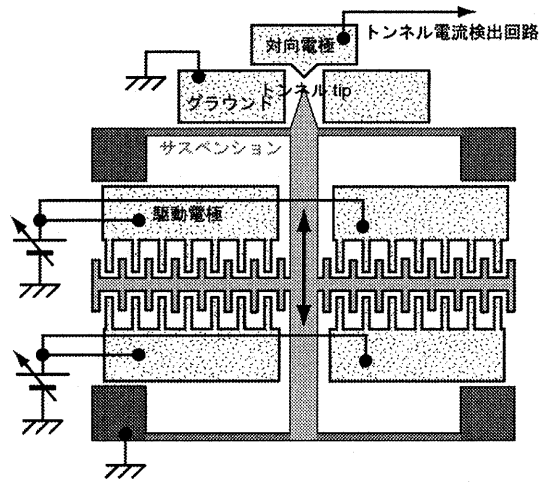


図 1: Micro-STM の構造

の長さは $800\mu\text{m}$ 、幅は $10\mu\text{m}$ であった。

STM の要とも言える tip の作製であるが、シリコン高アスペクトエッチングのプロファイルが完全な垂直ではなくパターンが細くなることを利用してアクチュエータ部分と同時に作製した。以下にその過程を述べる。(1) 表面から、ICP-RIE を行い、アクチュエータ構造を作製すると同時に探針部分のナノ構造ができる。図 3 に示すように、実際の ICP-RIE によるエッチング断面の形状にテーパ状で、これを利用するとパターンで細い部分はくびれたブリッジのようになる。(2) Si 表面を酸化して、HF で酸化膜を除去すると、ブリッジ部分を細らせることができる。これを用いて対向針を作製する。

図 4 に作製したナノブリッジの SEM 像を示す。太さ約 200nm のワイヤーが 200nm 程度の距離を隔てて対向しているのが分かる。

以上のように作製したトンネル tip がトンネル電流を検出できるかどうか大きな疑問になる。そもそも、トンネル電流による観察 (STM 観察) が一般に行なわれる理由は、原子分解能が得られるからである。このことは裏を返せば、「原子像が得られれば流れているのはトンネル電流である。」とすることができる。

これを確認するため、市販の STM 制御装置を用いてカーボングラファイトの原子像の観測を行なった。図 5 のように専用のトンネル tip の代わりに今回作製したトンネル tip を取り付けた。くし歯型アクチュエータは動く状態であるが、駆動電極は可動部と同じ電位にしているため動作しない。

この状態で観察した結果が図 6 である。ノイズが多くて判別しにくいだが、粒状の像が見える。この図の断面プロファイルを図 7 に示す。カーボングラファイトの原子間隔は約 0.25nm である。これらから得られた間隔は 0.256nm であるため、この像はカーボングラファイトの原子像であることが結論づけられる。この結果から今回作製したトンネル tip は、トンネル電流を検出できることが証明された。

また、くし歯型アクチュエータ構造もリリースされていたにもかかわらず、カーボン原子の周期を観測できたことから、原子間力に影響を受けない高い剛性を持っていると考えられる。

しかし、得られた像はまだまだ明瞭なものとはいえない。この理由として、tip の先端

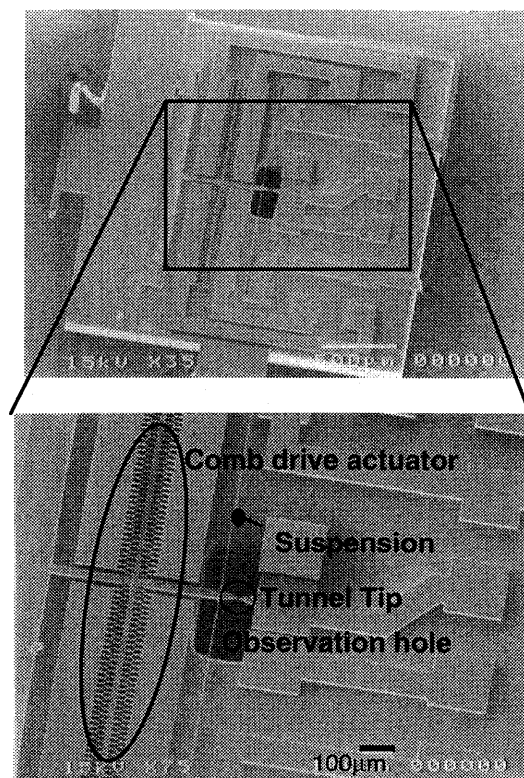


図 2: Micro-STM の SEM 像

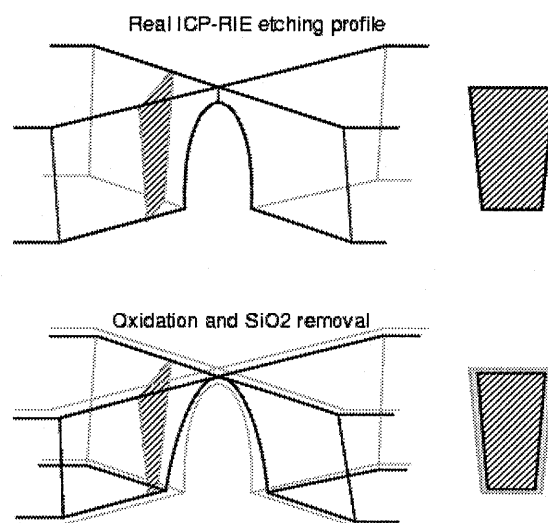


図 3: トンネル tip の製作方法

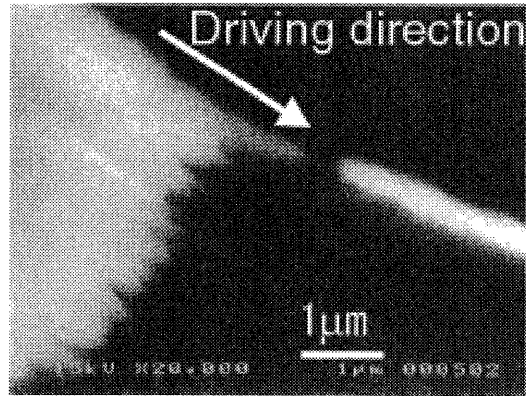


図 4: トンネル tip の SEM 像

半径が大きいことと tip の材質、トンネルギャップに対してトランスバース方向のバネ剛性に問題があると考察される。

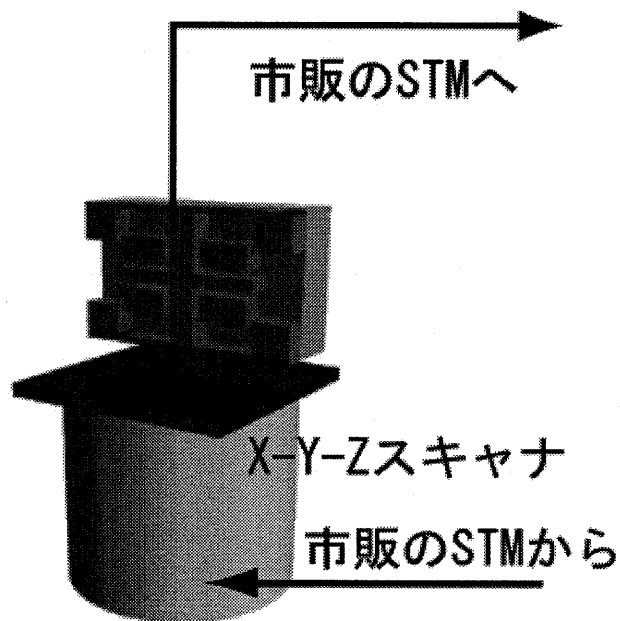


図 5: カーボングラファイト観測実験

まず、先端形状をさらに細くするため図 8 に示す製作方法によりトンネル tip を作製した。(1) 最初にシリコン窒化膜を堆積し、パターニングする。(2) 次に、アクチュエータを含む構造を ICP-RIE により作製する。(3) その後 LOCOS プロセスにより、シリコン窒化膜の下以外の部分を酸化する。(4) シリコン窒化膜を除去し、(5) KOH により異方性エッチングを施すと、酸化された部分はエッチングされないため、tip の部分のみがエッチングされ tip が形成される。しかも、できあがった 2 本の Tip は自己整合的に位置が揃っているというプロセス上の利点がある。

図 9 に、先鋭化したトンネル探針の SEM 写真を示す。このトンネル探針の先端半径は

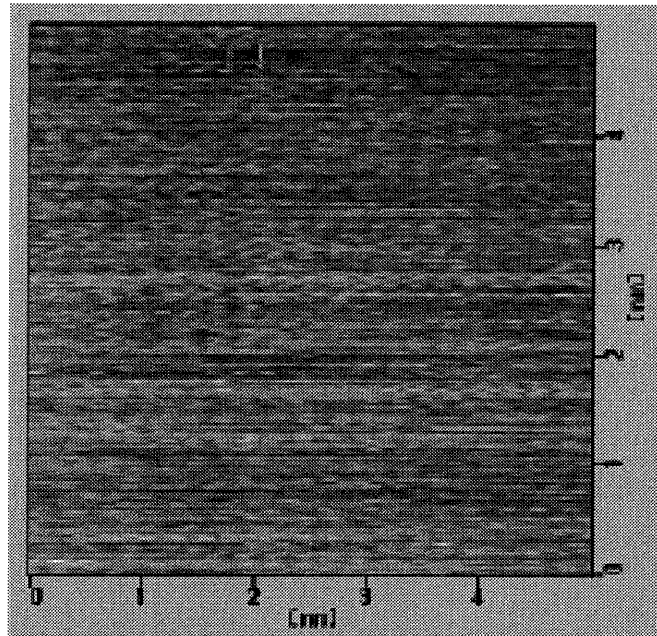


図 6: カーボングラファイト像

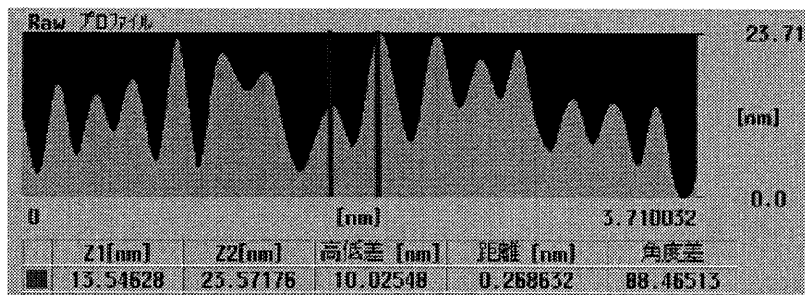


図 7: カーボングラファイト像

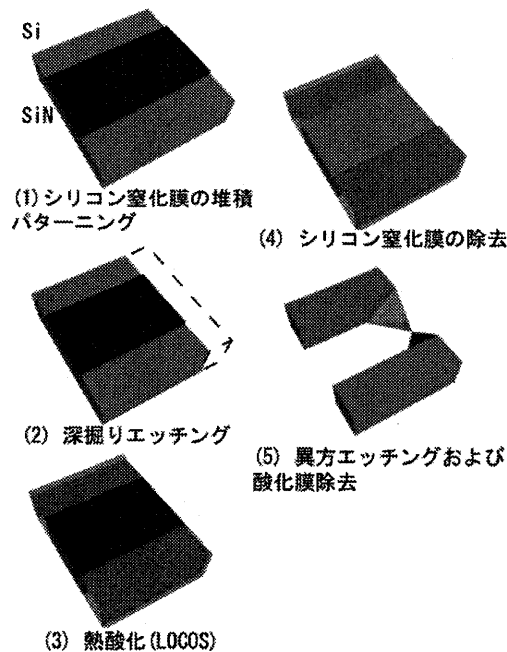


図 8: 異方性エッチングを用いた tip の作製

数十 nm ほどに尖っていることが確認できる。

このデバイスを用いて、トンネルギャップを制御する実験を行った。同一チップ上に駆動電極とトンネル電流を検出する電極があるため、アクチュエータを駆動する駆動信号が寄生容量によりトンネル検出回路にリークしてしまう。その結果、トンネル電流がノイズに埋もれ計測できなくなってしまう問題がある。

そこで、極めて基本的ではあるが、対向電極の周りに十分なグランド電極パターンを配置しリークによるノイズの低減を図った。また、チップへの配線にも十分にシールドを施すことにより、数十 mV (トンネル電流換算で数 nA) であったノイズを 1mV (同 0.1nA) 以下に抑えることができ、実際に行なった実験では、制御電圧と共に安定した状態で制御することができた。

さらに、作製した対向電極を持つチップを TEM の中に入れ、トンネル電流による制御を試みた。 10^{-5} Pa から 10^{-4} Pa 程度の真空度ではあるが、トンネル電流、制御電圧とも安定した状態 ($\pm 5\%$ 以下の揺らぎ) で制御することに成功した。すなわち、兼ねてからの懸案であった真空中での不安定現象を解決したことになる。

従来のマイクロマシン研究では、微動機構と粗動機構を同一のアクチュエータで行う例が多くあった。ところが、一つのアクチュエータで制御する場合、コントローラが十分な性能 (広いダイナミクスレンジ、高い位置決め精度) を持っていないと原子レベルでの制御は難しい。そのため、高精度な位置決めを行なうには粗動と微動を分けたほうが良い。また、粗動用アクチュエータは駆動距離が大きく、位置決め精度の高いものが必要となる。

以下では、Micro-STM システム用に開発された粗動機構であるインパクト駆動型アクチュエータについて述べる。弾性支持梁により支持された可動マスを静電引力により加速し、ストッパーに衝突させる。この時の衝撃力によりアクチュエータ全体を動かすというのが基本原理である。

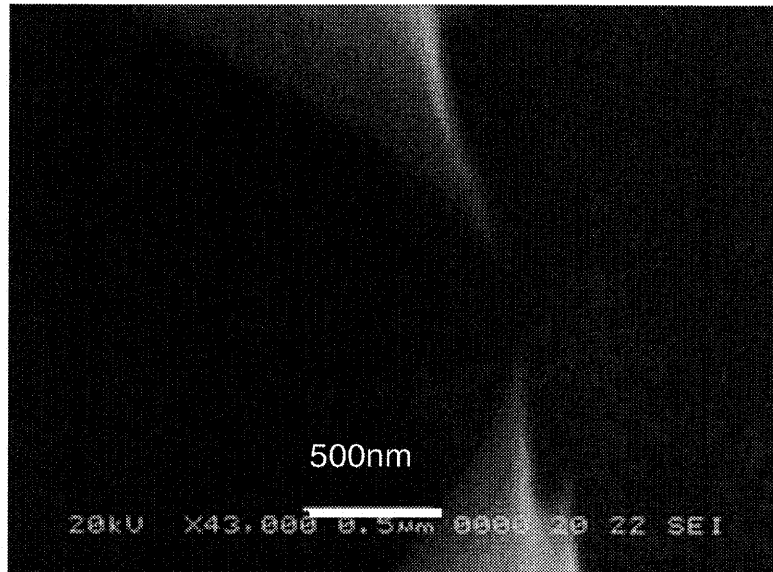


図 9: Close-up SEM view of the tunneling tip

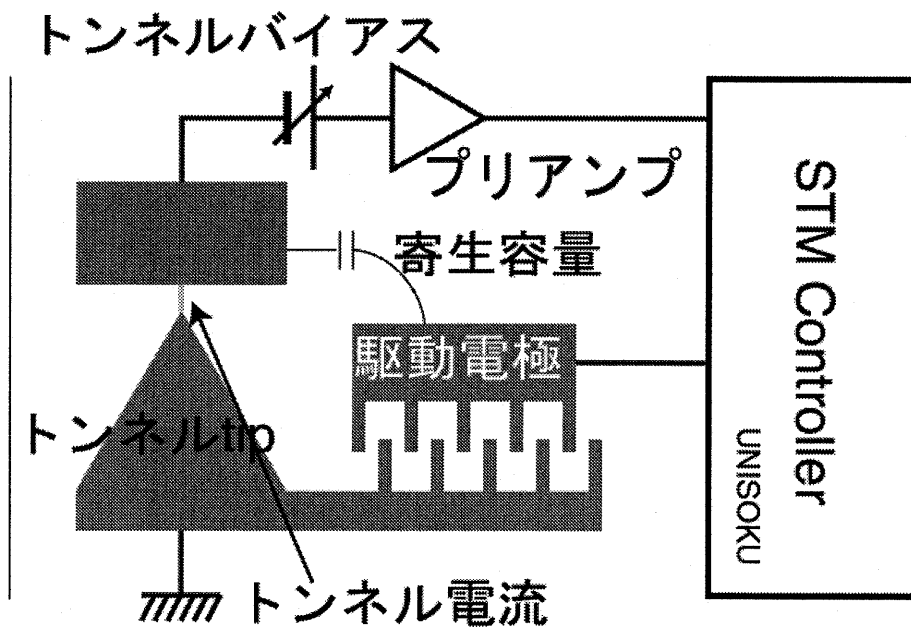


図 10: トンネル電流制御方法

図 11 にアクチュエータの構造を示す。

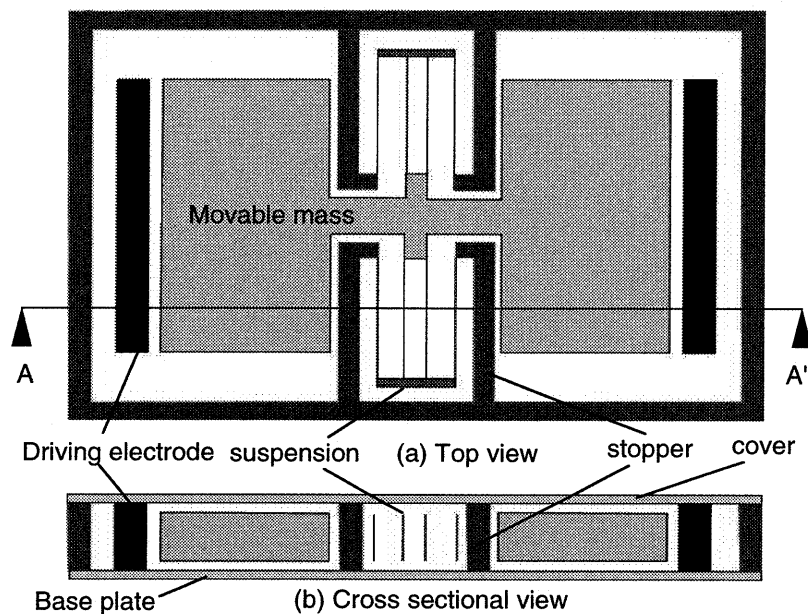


図 11: Structure of impact actuator

今回は配線の容易さなどを考え、プロトタイプとして蓋なしのアクチュエータを製作した。図 12 にその電子顕微鏡写真を示す。

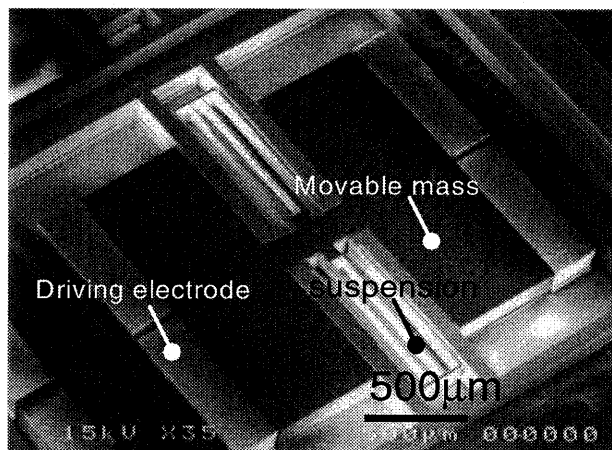


図 12: SEM view of the actuator

駆動実験を行うため、可動マスと駆動電極に金線でワイヤボンディングし、周波数 200Hz、印加電圧 110V を供給した。このときの自走速度は、約 $2.7\mu\text{m/s}$ であり、一回の衝突による移動距離は約 13.5nm であった (図 13)。

本研究では、動作の理論的解析を行った。簡単のため一定の電圧を与えた場合を考える。この場合、このモデルの系は保存場となるのでエネルギー保存則で運動を解析することができる。静電エネルギーは可動マスの運動エネルギーに変換され、さらに、アクチュエー

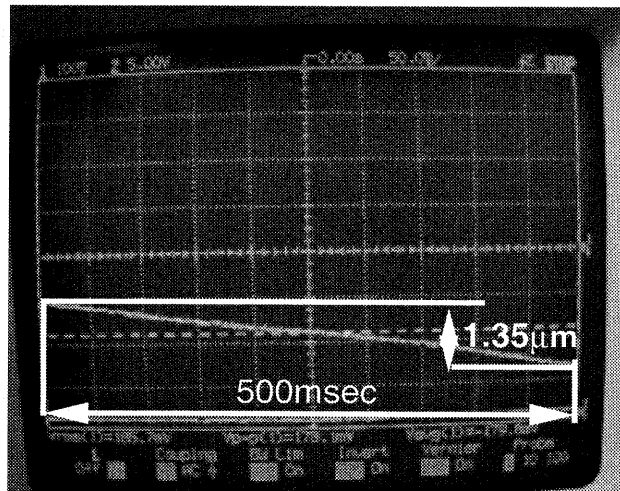


図 13: Displacemnt

タの運動エネルギーに変換される。そして、その運動エネルギーが床面との摩擦によりすべて消費されるまで進む。

このような計算で得られた一ステップ当たりの移動量は数 μm であったが、実際のデバイスを用いた実験では数十 nm であり大きな開きがあった。そこで、ストッパーや駆動電極と可動マス間に働く squeezed film ダンピング効果を考慮した計算を行なった。その結果得られた移動距離は $10\sim 15\text{nm}$ と実験結果に極めて近い値となった。このことから、このアクチュエータの運動において squeezed film ダンピング効果が大きな影響を与えていることが確認された。

以上のように本研究ではマイクロ STM システムの中で重要な要素となる、マイクロ STM の tip 微動・粗動機構の製作と理論的検証を行って来た。マイクロ STM の構成材料として厚いシリコン構造を採用することで、tip 先端を試料間における原子間力に打ち勝つことのできる高剛性の構造と大きな発生力が得られた。さらに、マイクロ STM 用粗動機構を提案し製作および評価を行ない、粗動機構として使えることが分かった。これらの結果から本研究で提案している粗動機構を有したマイクロ STM システムが実現可能であることが分かった。