③ ナノエンジニアリングを目指す超微細マイクロプローブ*

小 野 崇 人**, 江 刺 正 喜**

小野 崇人

江刺 正喜

Ultra Precise Microprobe for Nano-engineering*

by Takahito ONO** and Masayoshi ESASHI**

キーワード：マイクロマシニング，走査型プローブ顕微鏡，近接場光学顕微鏡

1. は じ め に

走査型プローブ顕微鏡に代表されるマイクロプローブ技術は原子・分子・ナノの世界を，人間が直接手に取るように観察することができる有用な道具であり，サイエンスツールとしては完成しつつある．今後，この道具はエンジニアリングツールとしての役割が大きく期待されている．この技術において未完成であり，今後の発展が大いに期待されるのが，走査型プローブ顕微鏡の目であり，かつ手にあたる部分，つまりマイクロプローブである．このマイクロプローブに複雑な機能を持たせ，顕微鏡としてだけではなく，“みて，あやつる”などの複合的機能が分子・原子エンジニアリングの目的には必須になる．このマイクロプローブの作製には，マイクロマシニングを利用した超微細加工技術が不可欠である．マイクロプローブに複雑な動作をさせるためには，集積回路，センサー，光学部品，アクチュエーターなどの様々な要素を集積化していく必要がある．本稿ではプローブに超微細加工を施し，様々な機能を持たせた例をいくつか紹介する．

2. 近接場マイクロプローブ

光を利用した様々なデバイスでは，光の波動性による回折によりその最小スポット径が制限される．近年，近

接場光を利用し，回折限界を超えて波長よりもずっと小さな光を利用できるようになった．この技術は，近接場光学顕微鏡として広く用いられるようになった．また高密度光記録など，産業界への応用も期待されている．

光の波長以下の寸法を持つ微小な金属開口は光がほとんど伝播せず，開口近傍には近接場が形成される．この微小開口を形成したプローブを用いて表面を走査し，観察試料と近接場との相互作用により散乱された光を検出する．一般的に用いられている光ファイバプローブでは，光がそのプローブ先端の光の波長よりも狭い径の領域を通り抜け微小開口に達するまでにかなりの損失があり，光の透過特性が悪い．我々は，シリコンの微細加工技術を利用して，数十 nm の大きさを持つ微小開口を形成する技術を開発した^{1,2)}．このプローブは，探針先端の開口角度が大きくできるため，光の透過率が非常に高くできる特徴を持つ．

微小開口を形成した近接場光学顕微鏡用のシリコンプローブの模式図を図 1 に示す．微小開口の作製には，シリコンを酸化する際に，シリコンの異方性エッチングにより形成したエッチピットの底では酸化膜の厚さが他の部分より薄いこと利用している．シリコンのエッチピットを形成したシリコンを酸化後，酸化膜のエッチング溶液で少しだけエッチングすれば微小開口が簡単に形成できる．最後にアルミニウム等の金属膜を堆積し金属の微小開口を形成する．図 2 はこのようにして作製した微小開口をもつシリコンマイクロプローブ(a)およびその先端に形成した 25nm 径の微小開口(b)の電子顕微鏡像である．作製した微小開口は，100nm の直径で光の透過率

*原稿受付 平成 12 年 6 月 26 日

** 東北大学 Tohoku University

図1 マイクロマシニング技術を用いて作製した近接場光学プローブ。容量型構造を持ち、カンチレバーの変位は容量の変化として検出できる。

図2 プローブの走査型電子顕微鏡写真(a)と探針先端に形成した25nm直径の金属微小開口(b)、および微小開口内部に金属配線を形成した同軸構造(c)

(入射した光強度に対する近接場強度の比)が 10^{-2} (1パーセント)程度と非常に高い³⁾。通常用いられている光ファイバプローブでは、同じ径で 10^{-5} 程度である。この片持ち梁の根元から微小開口上に光導波路を形成し、光ファイバと連結させて光を導くことも可能である⁴⁾。

図2(c)は更に光の透過率を上げるために、金属微小開口の内部に金属配線を形成した。この構造はビデオケーブルと同様に同軸構造となっており、光の波長よりも狭い導波部分で損失が少ないため、光の透過率が高いと期待できる³⁾。

3. 電磁駆動マイクロプローブ

マイクロプローブに駆動機構を内蔵すれば、表面の凹凸に追従してプローブを動かし、探針-表面間の力を一定に保つことができる。マイクロプローブはサイズが小

図3 片持ち梁がアクチュエーターとして働くマイクロプローブの電子顕微鏡写真

図4 電磁力による駆動の模式図。ねじれ片持ち梁振動部の駆動(上図)と片持ち梁型アクチュエーターの駆動(下図)

さく、共振周波数は高く形成できるため、高速の走査も可能になる。先端に高感度の力センサーおよび駆動機能を持つ電磁駆動式のセンサー(走査型プローブ顕微鏡用のセンサー)をここで紹介する⁵⁾。図3にその電子顕微鏡写真を示すように、このセンサーはシリコンの片持ち梁とその先端の‘ねじれ型片持ち梁’から構成されている。このねじれ型片持ち梁は、力センサーとして働き、シリコンの片持ち梁部は駆動のための電磁駆動アクチュエーターとして働く。

ねじれ型片持ち梁は、細長いシリコンの薄膜プレートが、その両側を2本の細い梁で支えられている。プレート先端が力を受けると、2本の梁を軸にねじれる(図4の上図)。また、2つの金属配線のループがねじれ片持ち梁の上に形成してある。このため、外部から磁場を与え、一方の金属ループに交流電流を流すと印加磁場と電流とのローレンツ力により、ねじれ片持ち梁はトルクを受けねじれ振動する。振動子の振動周波数の変化から高感度に力を測定できる。このねじれ片持ち梁の共振周波数はMHz以上に作ることが可能である。

図5 熱型プローブアレイと探針部分の断面図および電子顕微鏡写真

4. 熱型マイクロプローブ

前述した近接場プローブ顕微鏡の作製技術を応用すると、微細な金属配線を探針先端に持つ微細構造が作製できる⁶⁾。図5にそのプローブ探針部分の断面図を示すように逆ピラミッド状のエッチピット先端に金属を埋め込み、100nm程度の直径を持つ金属のナノ細線を探針先端に形成した。この酸化膜でできた逆ピラミッドの先端には微小な穴が空いており、金属ナノ細線から電極を取り出すため別の金属(Ni)が探針上に堆積してある。微小なホールを介して100nm程度の直径をもつ金属-金属接合が形成されている。この構造体は、金属ナノ配線に電流を流し加熱できるとともに、異種金属接合部の起電力を測定し温度センサーとして用いることもできる。こ

のプローブは、表面の温度分布を測定する熱の表面プローファイラー、熱を利用した高密度記録デバイス、光熱変換を利用した表面分析等に応用できる。

5. おわりに

マイクロマシニング技術を用いれば、高度な機能を持つ走査型プローブ顕微鏡用のプローブが作製できる。このプローブは表面を観察する手段としてだけでなく、加工、記録、操作などの複雑な動作が要求される。また、プローブに集積回路を内蔵させ、大量のデータの信号処理や与えられた命令に対する自動化を実現する必要がある。プローブのアレイ化、様々な光部品、センサー、アクチュエーターなどの集積化が今後より進むと期待される。

参考文献

1) P. N. Minh, T. Ono, M. Esashi, Applied Physics Letters, 75 (1999) 4076
2) P. N. Minh, T. Ono, M. Esashi, Sensors and Actuators A, 80 (2000) 163
3) P. N. Minh, T. Ono, M. Esashi, Review of Scientific Instruments, 71 (2000) 3111.
4) W. Qian, P. N. Minh, T. Ono, M. Esashi, International Conference on Electrical Engineering, HongKong (1999) 284
5) D.W. Lee, T. Ono, M. Esashi, Sensors and Actuators 83, (2000) 11
6) N. Takamira, D.W. Lee, P. N. Minh, T. Ono, M. Esashi, TECHNICAL DIGEST OF THE 17TH SENSOR SYMPOSIUM, (2000), 423

[テキスト]

ろう付の新しい可能性を探る
—先端科学は生産にどこまで役立てられるか—

社会法人溶接学会
界面接合研究委員会
1999年10月発行 定価 3,000円

ご注文その他については下記へお問い合わせ下さい。

社団法人 溶接学会
〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間1-11
☎03-3253-0488 ファックス03-3253-3059