

## ナノ加工実験用電子顕微鏡ステージの試作

北大院工 ○田尻 隆幸、浜田 弘一、有田 正志、岡田 亜紀良

## 要旨

プロセスを直接観察しながらのナノドット形成を行うために、簡易型 STM を組み込んだ透過型電子顕微鏡 (TEM) 用特殊ステージを作製し、その基本性能 (駆動機構の動作、トンネル電流の測定、ドットの作成) を確認した。

## 背景と目的

磁気ナノドットはスピンによる量子効果のメカニズムを解明するといった基本的な視点からだけでなく、メモリーやトンネル素子などのデバイスへの応用面まで盛んに研究されている。磁気ナノドットの形成法として電子線リソグラフィ、マスク蒸着などが挙げられるが、ここでは走査プローブ顕微鏡 (SPM) を用いた手法に注目した。これは探針と試料の間にパルス電圧を加えてドットを形成する一種のナノ付加工技術である。

SPM開発当初からドット形成実験は行われており、Mainらは走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いて、+3.6 V、600 ns のパルス電圧により  $\phi$  10 nm 程度のドットを作製している<sup>(1)</sup>。また、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、CoCrドット ( $\phi$  40 nm、5 nm厚) を +12 V、900 ms の条件で形成した例もある<sup>(2)</sup>。この手法においては、探針のアプローチ、ドットの形成、形状観察を全て同一の探針で行っているが、位置決めの際に重要な役割を担う探針形状はドット形成により変化する。

本研究においては SPM シグナルにかわって、TEM 像を探針アプローチの指標として用いることにより、安定したドット形成を目指す。そのための第一歩として TEM/STM ステージを試作し、その基本性能を調べた。高性能なステージは、ドット形成プロセスのその場観察、制御された幾何学的配列を持つ量子ドット列の作製を可能にし、ナノ電気伝導研究への寄与が期待される。

## ナノ加工実験用 TEM ステージシステム

ナノ加工実験用 TEM ステージを図 1 に示す。これは日本電子製 200CX 顕微鏡用であり以下の要件を満たすように設計したものである。

1. サイズ: TEM 内に挿入できる寸法 (5 mm × 9 mm × 50 mm) に全機能を搭載
2. 動作環境: 真空
3. 位置決め粗動機構: TEM 外部から機械的に基板を  $\mu$ m 精度で二軸駆動 (駆動距離: 約 2 mm、数十  $\mu$ m)
4. 位置決め微動機構: チューブ型 piezo 素子により探針を nm 精度で三軸駆動
5. 電気回路: 基板-探針間でのトンネル電流の計測および、パルス電圧の印可可能

システム全体の構成を図 2 に示す。システムは、ステージの他、各種電源およびアンプから構成されている。また、図 3 にはチューブ型 piezo 素子の概略図が示してある。素子は自作の  $\pm$  100 V 直流安定化電源を用いて x、y、z 方向にそれぞれ 1  $\mu$ m、10  $\mu$ m、10  $\mu$ m のストロークを持つようにした。

基板-探針間のトンネル電流測定のために、プリアンプを作製し TEM ステージに組み込んだ。なお最終的な STM データの測定、計測は日本電子製 STM コントロールシステム (WCONT) により行った。

また、ドット形成用の電圧印可にはパルス信号が必要である。基板-探針間に 0 ~ 3.5 V、1 ~ 3 ms のパルス電圧を印可できる発信電源を作製した。

## 性能試験・性能評価

上記のように作製したステージの性能を位置決め、トンネル電流検出、ドット形成の観点から評価した。

- ・粗動機構: ほぼ設計どおりの駆動距離を実現できた。位置決めの際に、多少の機械的“遊び”があったが、これについてはステージの加工精度を向上させることにより改善できると考えている。
- ・微動機構: piezo 素子駆動電圧と探針位置変化 (X 軸方向) の関係を図 4 に示す。最大  $\pm$  1  $\mu$ m のヒステリシスがもあったが、 $\pm$  6  $\mu$ m の駆動変化を実現できた。また Z 軸方向に沿っては 1  $\mu$ m の位置変化が確認できた。微動機構の位置精度については高倍率において明瞭な TEM 像観察が可能か否かにより、大まかな判断ができる。微動機構に Si 探針を、粗動機構には基板のかわりに Au 探針を取り付け、TEM 観察をしたところ、30 万 ~ 50 万倍の高倍率でも像はぶれることなく観察できた。Y 方向 (図 3 参照) の位置調節 (TEM 像の焦点ずれによる位置認識) に多少の煩雑さはあるものの、位置決めについてはほぼ仕様を満たしている。基本的には基板上の任意位置に探針をアプローチできる。
- ・トンネル測定: TEM で観察しながら Si 探針 (アース)、Au 探針 (バイアス印可) を接近させ、トンネル電流を計測した。同様に、Au-Au 探針間のトンネル電流を計測した。結果の一例を図 5 に示す。この図はトンネル接合に特徴的な電流-電圧特性を示し

ており、Simmonsの式<sup>(3)</sup>を用いた解析からトンネル厚さ1.4 nm、障壁高さ7.6 eVが得られた。これらの妥当な値が得られたことは、トンネル電流測定が正常に行われたことを意味している。

- ・ドット形成：粗動機構側のAu探針をアースに、微動機構側のAu探針をパルス電源に接続して、TEMで観察しながら、パルス電圧を印可してドットを形成した(図6)。探針を接近させ(図6 a)、パルス電圧印可するとナノブリッジがつくられた(図6 b)。その後探針を遠ざけることにより左側の先端にナノドットが形成された(図6 c)。

まとめ

TEMの真空度が不十分であるため探針先端が、時間と共に汚れるなど今後解決すべき問題はあるものの、必要な仕様を持つTEMステージシステムの作製に成功した。パルス電圧の大きさや印可時間、探針距離などのドット形成条件を調べるのが今後の課題である。

本研究の一部は科研費基盤C(13650708)の援助のもとに行われた。

参考文献

- (1) H.J.Main, P.H.Guethner, and D.Rugar : Atomic Emission from a Gold Scanning - Tunneling - Microscope Tip, Phys.Rev.Lett. , **65**, 2418 (1990)
- (2) K.Bessho, Y.Iwasaki, and S.Hasimoto : Nano Magnetic Mounds Fabricated using a Scanning Probe Microscope, IEEE Trans.Magn. , **32**, 4443 (1996)
- (3) John G. Simmons : Generalized Formula for the Electrodes Separated by a thin Insulation Film, J.Appl.Phys. , **34**, 1793 (1963)

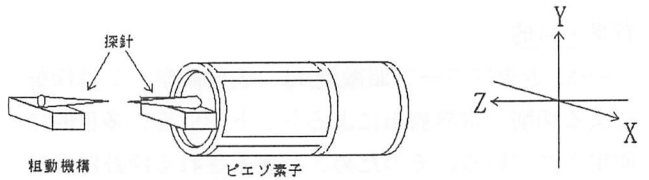


図3 座標軸



図1 作製したTEMステージ

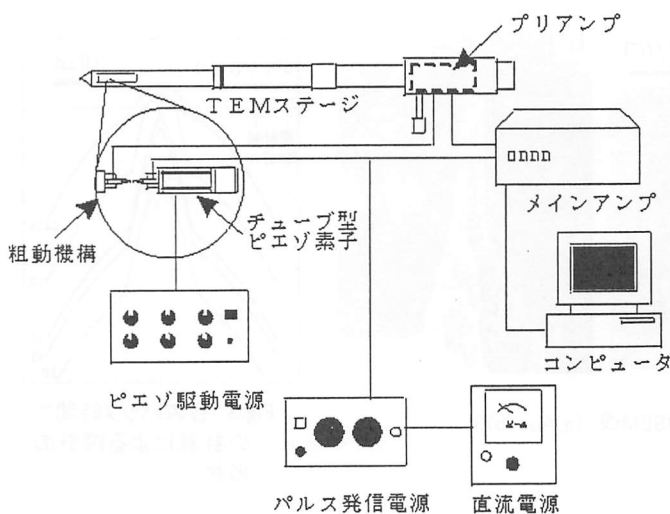


図2 システム構成概略図

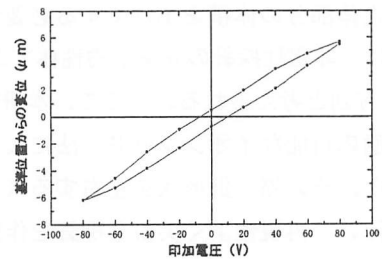


図4 ピエゾ素子X方向のヒステリシス曲線

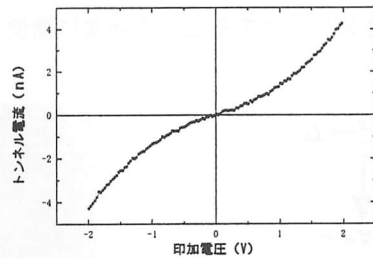


図5 Au-Au間トンネル電流



図6 Auドットの形成過程